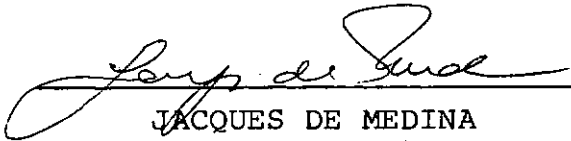


PROJETO DE REFORÇO DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS
E AEROPORTUÁRIOS PELO MÉTODO DA
RESILIÊNCIA: UMA NOVA VERSÃO
DO PROGRAMA TECNAPAV

Régis Martins Rodrigues

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE
PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE
JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO
DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS (M.Sc.) EM ENGENHARIA CIVIL.

Aprovado por:


JACQUES DE MEDINA
(Presidente)


ERNESTO SIMÕES PREUSSLER


DIRCEU DE ALENCAR VELLOSO

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

SETEMBRO DE 1987

RODRIGUES, RÉGIS MARTINS

Projeto de Reforço de Pavimentos Rodoviários e Aeroportuários pelo Método da Resiliência: uma Nova Versão do Programa Tecnapav(Rio de Janeiro) 1987.

VII, 104p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia Civil, 1987).

Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro.

I. Pavimentos.

I. COPPE/UFRJ

II. Título (série)

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Jacques de Medina pela orientação e incentivo.

Ao Professor Ernesto S. Preussler, responsável, em todos os sentidos, pela origem deste trabalho.

Ao Engº Salomão Pinto pelas discussões e sugestões oportunas.

À Cristina pela datilografia.

Ao Max pelos desenhos.

RESUMO DA TESE APRESENTADA À COPPE/UFRJ COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS (M.Sc.)

PROJETO DE REFORÇO DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS
E AEROPORTUÁRIOS PELO MÉTODO DA
RESILIÊNCIA: UMA NOVA VERSÃO
DO PROGRAMA TECNAPAV

Régis Martins Rodrigues

Setembro de 1987

Orientador: Jacques de Medina

Programa: Engenharia Civil

Apresenta-se um procedimento de cálculo para a determinação da espessura necessária de camadas de reforço em pavimentos flexíveis e semi-rígidos, baseado na previsão das deflexões do pavimento através de modelos desenvolvidos a partir da Teoria da Elasticidade Não-Linear e de soluções existentes para sistemas lineares elásticos. Esta formulação foi aplicada como uma extensão do programa TECNAPAV, de gerência de pavimentos, de modo a que fosse possível a consideração de cargas mais elevadas que a do eixo padrão rodoviário de 80 kN, atuando numa estrutura de pavimento com um número qualquer de camadas.

ABSTRACT OF THESIS PRESENTED TO COPPE/UFRJ AS PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE (M.Sc.)

OVERLAY DESIGN BY THE RESILIENCY METHOD
FOR HIGHWAY AND AIRPORT PAVEMENTS:
A NEW VERSION OF TECNAPAV
PROGRAM

Régis Martins Rodrigues

September, 1987

Chairman: Jacques de Medina

Department: Civil Engineering

An overlay design procedure for flexible and semi-rigid pavements is presented. It is based on models developed from the Theory of Elasticity, either existing solutions for linear elasticity or from non-linear elasticity. The computer program TECNAPAV used for pavement management system was extended in order to take into account loads heavier than the standard 80kN-axle load of highway vehicles, and to consider any number of layers in the pavement structure.

ÍNDICE

	PÁG.
CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	1
I.1. O Método da Resiliência Aplicado ao Projeto de Reforço de Pavimen- tos Flexíveis	3
I.2. O Programa TECNAPAV	7
CAPÍTULO II - MODELOS	16
II.1. Cálculo de Deflexões	17
II.2. Equivalência entre Camadas	24
II.2.1 - Camadas superiores	24
II.2.2 - Camadas inferiores	25
II.3. Módulo Equivalente de Bases Gra- nulares	27
II.4. Cálculo de Tensões	30
II.5. Carga de Roda Simples Equivalen- te	32
II.5.1 - CRSE em termos da de- flexão no centro de uma das rodas e na su- perfície do pavimento	33
II.5.2 - CRSE em termos da ten- são vertical no centro de uma das rodas e na interface com o sublei- to	36

II.5.3 - CRSE em termos da tensão horizontal de tração no centro de uma das rodas e na base do revestimento	38
---	----

II.6. Redução do Módulo Efetivo do Revestimento com o Trincamento	39
--	----

CAPÍTULO III - ESTRUTURA DO PROGRAMA	52
--	----

III.1. Dados de Entrada	52
-------------------------------	----

III.2. Método de Solução	54
--------------------------------	----

III.3. Fluxograma Simplificado	58
--------------------------------------	----

CAPÍTULO IV - PREVISÃO DE DEFLEXÕES	64
---	----

CAPÍTULO V - NÍVEIS OPERACIONAIS	72
--	----

CAPÍTULO VI - APLICAÇÃO DO PROGRAMA	79
---	----

CAPÍTULO VII - COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES	85
---	----

APÊNDICE - LISTAGEM DO PROGRAMA	88
---------------------------------------	----

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	101
----------------------------------	-----

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Como sequência aos estudos de resiliência de solos e misturas asfálticas iniciados de forma objetiva em fins de 1977 na COPPE/UFRJ e consubstanciados na tese de doutorado de PREUSSLER (1), defendida em 1983, PREUSSLER e PINTO (2) apresentaram um método de dimensionamento de reforço de pavimentos flexíveis que utiliza um programa computacional intitulado TECNAPAV (Tecnologia Nacional para Restauração de Pavimentos Rodoviários e Aeroportuários). Apoiaram-se os autores nos resultados da pesquisa sobre Avaliação Estrutural de Pavimentos, empreendida pelo IPR/DNER e firmas de consultoria de janeiro de 1979 a setembro de 1985.

De um modo geral, recapeamentos asfálticos são utilizados na restauração da suavidade ao rolamento das superfícies dos pavimentos e/ou para seu reforço estrutural. Este último torna-se necessário quando da recuperação de pavimentos trincados ao fim de sua vida de serviço ou quando se prevê que o pavimento será submetido a cargas mais pesadas ou a um número maior de solicitações que o considerado no projeto original. Nestes casos, é fundamental a análise mecânica do pavimento à luz de sua capacidade estrutural presente e daquela que terá após o recapeamento.

O programa TECNAPAV determina a espessura necessária da camada de reforço em concreto asfáltico a ser aplicada de modo que a vida de serviço do pavimento restaurado seja aquela correspondente a um certo nível de trincamento a ser atingido, no caso de pavimentos rodoviários, ou à vida de fadiga das camadas asfálticas, no caso de pavimentos aeroportuários. Para isso, a deformação elástica (deflexão) do pavimento é avaliada, levando em conta o comportamento resiliente dos solos e materiais granulares que usualmente constituem as camadas de base, sub-base, reforço do subleito e subleito dos pavimentos flexíveis típicos das rodovias de tráfego mais pesado.

Os modelos utilizados pelo programa prevêm a deflexão produzida entre as rodas duplas do eixo padrão rodoviário de 80 kN, num perfil de pavimento de três camadas, constituído por: revestimento em concreto asfáltico, base granular (com parâmetros de resiliência fixados) e subleito (de três tipos quanto à resiliência).

A fim de estender o programa a pavimentos, flexíveis e semi-rígidos, com qualquer número de camadas e abrangendo uma faixa mais ampla de variação dos parâmetros resilientes das mesmas, bem como permitir a previsão de deflexões causadas por outras cargas, superiores à do eixo de 80 kN, rodoviárias ou aeroportuárias, elaborou-se um procedimento baseado nos seguintes pontos:

- (i) Estimativa do módulo de cada camada cujo modelo de resiliência é não-linear;
- (ii) Transformação da estrutura de n camadas num perfil de três camadas, equivalente ao primeiro em termos deflectométricos;
- (iii) Cálculo da Carga de Roda Simples Equivalente, no caso de carregamentos de roda múltiplas;
- (iv) Cálculo da deflexão.

Os modelos para a execução de cada uma dessas etapas foram desenvolvidos a partir dos programas FEPAVE2 e ELSYM5. No caso do cálculo da deflexão, os modelos são para estruturas de quatro ou de três camadas, definidas por parâmetros cuja faixa de variação é ampla o suficiente para abranger uma vasta gama de perfis usuais. A restrição a uma determinada faixa se fez necessária a fim de que os modelos, obtidos por correlação linear múltipla, apresentassem elevados coeficientes de determinação (R^2) e baixos valores de desvio-padrão (S). Se a estrutura de três camadas obtida estiver fora dessa faixa, uma transformação adicional será feita e a deflexão será calculada pelas soluções para sistema de duas camadas de BURMISTER (3) ou de UESHITA e MEYERHOFF (4).

O procedimento aqui adotado, exclusivamente baseado em equações, tornou-se necessário tendo em vista a inexistência de

um método de análise mecanística (como um programa de elementos finitos) que calculasse a deflexão máxima de um pavimento levando em conta, simultaneamente:

- (i) o comportamento elástico não-linear dos solos e materiais granulares; e
- (ii) a ação conjunta das várias cargas de roda de um mesmo eixo ou trem-de-pouso.

Ao mesmo tempo, como é necessário que se analise um número considerável de perfis alternativos antes de se chegar à melhor solução, as equações simplificam este processo, reduzindo o tempo computacional em relação àquele que seria requerido com o uso de um programa de elementos finitos ou de diferenças finitas.

São conhecidas as limitações de programas baseados na Teoria da Elasticidade como o FEPAVE2 (meio estratificado elástico não-linear e uma só carga de roda) e o ELSYM5 (meio estratificado elástico linear e cargas múltiplas). Dessa forma, o método aqui adotado integrará as características desses dois programas, no intuito de se obter uma subrotina que, acrescentada ao programa TECNAPAV, permita que se amplie seu campo de aplicação.

I.1 - O Método da Resiliência Aplicado ao Projeto de Reforço de Pavimentos Flexíveis

Define-se a deformação resiliente de um pavimento como a deformação elástica ou recuperável por ele experimentada sob a ação dinâmica da passagem dos veículos. Utiliza-se o termo "resiliência" e não "elasticidade" para tornar clara a idéia de que os solos e materiais de pavimentação apresentam comportamento elástico apenas quando submetidos a cargas de curta duração, como ocorre durante a passagem de um veículo. Além disso, o módulo resiliente não é igual ao módulo tangente inicial medido num ensaio triaxial estático, o que se deve à mobilização de efeitos inerciais e viscosos durante a solicitação dinâmica.

O método da resiliência fundamenta-se na hipótese de que

as deflexões (deslocamentos elásticos ou resilientes) sofridas pelo pavimento com a passagem de um veículo podem ser previstas pela Teoria da Elasticidade, utilizando os módulos resilientes dos materiais constituintes das camadas determinados em laboratório através de ensaios de carga repetida (compressão diametral para materiais asfálticos e cimentados e triaxial para solos e materiais granulares). Esta hipótese recebeu um forte apoio no caso de pavimentos flexíveis com camadas granulares através dos trabalhos de PREUSSLER (1) e de PREUSSLER, MEDINA e PINTO (5).

Para o cálculo da deflexão, dispõe-se atualmente de uma série de soluções na forma de ábacos ou de modelos estatísticos seja para sistemas de duas, três ou quatro camadas (Refs.6, 7 e 8). Tendo em vista as inevitáveis limitações de cada uma delas, foram desenvolvidos vários programas de computador para o caso de sistemas de várias camadas, sob a ação de uma ou mais cargas de roda. Os programas que têm recebido maior utilização nos estudos de Mecânica dos Pavimentos na COPPE/UFRJ e no IPR/DNER desde 1977 são os programas FEPAVE2 e ELSYM5, da Universidade da Califórnia.

O programa FEPAVE2 ("Finite Element Pavement Structures", Ref.9) utiliza o método dos elementos finitos (elemento axissimétrico de deformação constante). O programa calcula os deslocamentos nodais e as tensões no centro dos elementos devido à carga de uma roda, assimilada a uma área circular carregada por pressão normal uniforme. Admite-se até 12 camadas, as quais podem ter módulo resiliente constante ou variável com o estado de tensões em cada elemento, de acordo com os modelos:

(i) Para solos e materiais granulares

$$M_R = K_1 \sigma_3^{K_2}$$

(ii) Para solos finos coesivos

$$M_R = f(\sigma_d) = K_2 + K_3 (\sigma_1 - \sigma_d), \text{ se } \sigma_d < K_1 \\ K_2 + K_4 (\sigma_d - K_1), \text{ se } \sigma_d > K_1$$

- (iii) Outros, como para solos argilosos (modelos logarítmico e hiperbólico de FOSSBERG) e para argila estabilizada com cimento (modelo de WANG).

No caso de estrutura não-linear, a carga de roda é aplicada por incrementos, sendo os módulos dos elementos recalculados em função do estado de tensões gerado pelo incremento de carga anterior. Os módulos iniciais podem ser calculados considerando ou não o peso próprio das camadas. Outros dados de entrada são:

- (i) Coeficiente de Poisson e peso específico dos materiais das camadas;
- (ii) Coeficiente de empuxo de terras no repouso para os solos e materiais granulares;
- (iii) Variação do módulo resiliente dos materiais asfálticos com o gradiente de temperatura ao longo da espessura da camada betuminosa.

O programa é restrito à aplicação de apenas uma carga de roda e não considera esforços tangenciais aplicados na superfície de contato do pneu com o pavimento.

O programa ELSYM5 ("Elastic Layered System") admite a aplicação de até 10 cargas de roda num perfil de, no máximo, cinco camadas, as quais devem ter módulo constante. O programa utiliza o método das diferenças finitas no cálculo dos deslocamentos, tensões e deformações em pontos definidos pelo usuário, considerando a ação de apenas uma carga de roda. Se houver mais de uma, é feita a superposição dos efeitos de todas as rodas, procedimento este que é rigorosamente correto no caso da obtenção de deslocamentos em sistemas elástico-lineares, sendo, contudo, aproximado no caso do cálculo de tensões.

A utilidade principal desses programas, bem como de soluções postas em forma de âbacos e tabelas para casos particulares (Refs.6 e 7), é a avaliação das solicitações produzidas pela ação das cargas do tráfego e que podem provocar efeitos destrutivos no pavimento. Como exemplo destas solicitações, temos:

- (i) as tensões e deformações de tração na base e no

- topo de uma camada asfáltica;
- (ii) a tensão de tração na base de uma camada cimentada;
- (iii) as deflexões (deslocamentos verticais) no topo de cada uma das camadas, de modo a se avaliar a percentagem de contribuição de cada uma na deflexão total do pavimento;
- (iv) a tensão e a deformação vertical no topo do subleito.

Os efeitos (i) e (iii) importam para a verificação da suscetibilidade do revestimento asfáltico a sofrer trincamento por fadiga. A tensão de tração na base de uma camada cimentada (pavimentos semi-rígidos) é um parâmetro que governa sua ruptura sob a ação das cargas mais pesadas do tráfego, bem como seu desempenho à fadiga. Finalmente, os efeitos em (iv) são os responsáveis pelo acúmulo de deformações permanentes no subleito, estando ligados a defeitos como afundamentos em trilha de roda e ondulações.

Levando em conta o fato de ser o trincamento por fadiga dos revestimentos asfálticos o principal modo de deterioração dos pavimentos flexíveis no Brasil, fadiga esta provocada pela repetição das deflexões produzidas pela passagem dos veículos, vê-se que a consideração do comportamento da estrutura do pavimento com relação às deformações resilientes torna-se peça fundamental para o projeto de um pavimento novo, bem como para a determinação da espessura da camada de reforço no caso da restauração de pistas existentes.

O método de projeto proposto por PREUSSLER e PINTO (10) aplica o método da resiliência para encontrar a espessura de concreto asfáltico necessária para o reforço de pavimentos flexíveis com camadas granulares, levando em conta o comportamento à fadiga das misturas de concreto asfáltico projetadas de acordo com as especificações do DNER. Este método foi, posteriormente, estruturado em um programa de computador para a otimização do projeto, dentro de um programa gerencial de pavimentos (Ref.11): o programa TECNAPAV.

I.2 - O Programa TECNAPAV

O programa gera múltiplas alternativas de estratégia de recapeamento que satisfazem a condicionantes técnicos e econômicos definidos pelo projetista. Aplica-se tanto ao projeto em seções individuais como a estudos de alocação de recursos a nível de rede (Ref.2).

A condição estrutural do pavimento existente é dada pela deflexão de campo, medida com a viga Benkelman em prova-de-carga com o eixo padrão rodoviário de 80 kN. Esta deflexão, por sua vez, é utilizada no cálculo da espessura efetiva do revestimento existente que ainda apresenta comportamento em flexão, ou seja, que atua como uma camada íntegra, não-trincada, através dos modelos de PREUSSLER e PINTO (2):

$$hef = -5,737 + \frac{807,961}{D_C} + 0,972 I_1 + 4,101 I_2 \quad (I-1)$$

$$Hcg \leq 45 \text{ cm}$$

$$hef = -2,382 + \frac{984,938}{D_C} + 0,236 I_1 + 1,26 I_2 \quad (I-2)$$

$$Hcg > 45 \text{ cm}$$

onde:

hef - espessura efetiva do revestimento existente (cm);

D_C - deflexão de campo (0,01 mm);

Hcg - espessura da camada granular (cm);

I_1, I_2 - constantes relacionadas às características resiliantes do subleito (Tabelas I.1 e I.2).

A seguir, o programa aplica uma camada de reforço e calcula a deflexão prevista produzida pelo eixo de 80 kN através do modelo:

$$D_P = \left(\frac{238,140}{H_R + 19,015 + 1,357 hef - 1,016 I_1 - 3,893 I_2 - 5,230 I_3} \right)^2 \quad (I-3)$$

onde:

D_p - deflexão prevista na superfície da camada de reforço (0,01 mm);

H_R - espessura da camada de reforço em concreto asfáltico (cm);

I_3 - constante relacionada à espessura da camada granular (Tabela I.3).

Tabela I.1 - Definição do tipo do subleito

TIPO	% de silte na fração fina (passando na peneira nº 200)
I	menor ou igual a 35%
II	maior que 35% e menor ou igual a 65%
III	maior que 65%

Tabela I.2 - Valores de I_1 e I_2

Subleito	I_1	I_2
I	0	0
II	1	0
III	0	1

Tabela I.3 - Valores de I_3

Hcg (cm)	I_3
45	0
45	1

A vida de fadiga da camada de reforço é calculada pelos modelos (critério de fadiga):

$$\log N_t = \frac{3,148 - \log D_p}{0,188}, \text{ se } H_R \leq 10 \text{ cm} \quad (\text{I-4})$$

$$\log N_t = \frac{3,438 - \log D_p}{0,255}, \text{ se } H_R > 10 \text{ cm} \quad (\text{I-5})$$

onde:

N_t - número cumulativo de repetições da deflexão D_p que provoca o fim da vida de fadiga da camada de reforço.

O grau de trincamento superficial de pavimentos rodoviários, em termos de percentagem de área trincada (TRA), é avaliado através de modelo desenvolvido por QUEIROZ (12), a partir de observações de trechos experimentais construídos no Brasil:

$$TR = (-18,53 + CF_1) + D_p \log N (0,0456 + 0,00501 A) CF_2 \quad (\text{I-6})$$

$$CF_1 = (-2,406 D_p + 75,63) \left(\frac{TRA - 10}{90} \right), CF_1 \geq 0$$

$$CF_2 = (0,1217 D_p - 2,078) \left(\frac{TRA - 10}{90} \right), \text{ para } TRA > 10\%$$

$$CF_2 = 0,50 + 0,50 \left(\frac{TRA}{10} \right), \text{ para } TRA \leq 10\%$$

onde:

- TR - percentagem de área trincada na camada de reforço;
- D_p - deflexão prevista na superfície da camada de reforço (0,01 mm);
- N - número cumulativo de solicitações de eixos equivalentes ao eixo padrão de 80 kN até o ano A;
- A - número de anos a partir do recapeamento;
- TRA - percentagem de área trincada do revestimento anterior (pavimento a ser reforçado);
- CF_1, CF_2 - constantes determinadas experimentalmente.

As equações (I-1), (I-2) e (I-3) são correlações estatís

ticas desenvolvidas a partir de resultados do programa FEPAVE2. Estes mesmos resultados se encontram em forma gráfica na Ref.10.

Os modelos (I-4) e (I-5) foram obtidos através da análise de seções de pavimento pelo programa FEPAVE2, juntamente com resultados de ensaios de fadiga em concreto asfáltico (Ref.1).

O modelo (I-6), como desenvolvido originalmente (Ref.12), apresenta um coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,644 e um desvio-padrão (S) de 12,62, para um total de 47 pontos. Assim, o intervalo de confiança para um nível de confiabilidade de 97,5% será:

$$\begin{aligned} IC &= \hat{TR} \pm t.S \sqrt{1 + 1/n} \\ &= \hat{TR} \pm 2,01 \times 12,62 \sqrt{1 + 1/47} \\ &= \hat{TR} \pm 25,6 \end{aligned}$$

ou seja,

$$\hat{TR} - 25,6\% \leq TR \leq \hat{TR} + 25,6\%$$

onde \hat{TR} é o valor estimado pelo modelo (I-6) e TR é o valor correto. Dessa forma, se o valor estimado for $\hat{TR} = 50\%$, o valor correto para a percentagem de área trincada estará na faixa:

$$24\% \leq TR \leq 76\%$$

com 97,5% de confiança.

O modelo (I-6) é utilizado no TECNAPAV para se calcular o número de anos (A) para que a percentagem de área trincada do pavimento restaurado atinja pelo menos 50%. Como se deduz da análise acima, ao se estimar 50% de área trincada por esse modelo, o valor correto se encontrará na faixa de 24% a 76%, com 97,5% de probabilidade. Contudo, fixou-se 50% de área trincada como critério para indicar a condição do pavimento ao final da vida de serviço do recapeamento construído, quando, então, uma nova camada de reforço será necessária. Esta condição terminal é, na prática, variável, e a faixa coberta, de 24% a 76%, abran

ge as situações que comumente se considera como indicando o fim da vida de serviço de uma rodovia com relação ao trincamento. O modelo (I-6) é, portanto, suficientemente exato para os fins que se têm em vista no programa TECNAPAV.

No caso de pavimentos aeroportuários, a vida de serviço das camadas asfálticas é dada pelo somatório dos consumos a fadiga de cada aeronave do tráfego, para o que se aplica a Lei de Miner:

$$\sum_i \sum_{j=1}^{A_o} \frac{N_i}{N_T} \leq 1 \quad (I-7)$$

onde:

N_i - número anual de solicitações (coberturas) da aeronave i em termos do eixo padrão de 80 kN;

N_T - número admissível de solicitações do eixo padrão (critério de fadiga);

A_o - vida de serviço em anos da camada de reforço.

Várias justificativas experimentais foram obtidas com relação à aplicabilidade da Lei de Miner a misturas betuminosas (Ref.13). Em particular, esta lei se aplica melhor quando o critério de fadiga é dado em termos de deformações e não em termos de tensões (Ref.14).

Para a obtenção do número N_i são utilizados Fatores de Equivalência de Cargas (FC_i) entre cada aeronave e o eixo padrão de 80 kN:

$$N_i = \frac{N_{pi}}{R_i} \cdot FC_i \quad (I-8)$$

onde:

N_{pi} - número de passagens da aeronave i ;

R_i - relação passagem-cobertura correspondente.

O Fator de Equivalência de Cargas é definido por:

$$FC_i = \frac{N_{fp}}{N_{fi}} \quad (I-9)$$

ou seja, é igual à razão entre os números de coberturas do eixo padrão (N_{fp}) e da aeronave considerada (N_{fi}) que produzem um mesmo efeito destrutivo, sendo este definido de acordo com um certo critério. Dessa forma, é um número que, multiplicado pelo número de coberturas de um eixo i , fornece o número de coberturas do eixo padrão que produzirá o mesmo efeito destrutivo no pavimento. Como a vida de serviço, no caso do TECNAPAV aeroportuário, é determinada pela vida de fadiga das camadas asfálticas, o efeito destrutivo a ser utilizado no cálculo dos fatores de equivalência poderá ser o início da fissuração por fadiga. Assim, esses fatores foram calculados pelo modelo:

$$N_f = 2,99 \times 10^{-6} \left(\frac{1}{\epsilon t} \right)^{2,153} \quad (I-10)$$

obtido de ensaios de fadiga a tensão controlada em concreto asfáltico (Ref.1). A deformação específica de tração (ϵt) foi calculada pelo programa ELSYM5 numa estrutura de pavimento típica, constituída por revestimento asfáltico, base granular e subleito. Foram obtidos os seguintes fatores (Ref.15):

(i) Eixo simples de roda simples

$$FC = 0,07389 P^{1,085} \quad Hcg = 45 \text{ cm} \quad (I-11)$$

$$FC = 0,0878 P^{1,098} \quad Hcg = 75 \text{ cm} \quad (I-12)$$

(ii) Eixo simples de rodas duplas

$$FC = 0,0543 P^{1,235} \quad Hcg = 45 \text{ cm} \quad (I-12)$$

$$FC = 0,0615 P^{1,234} \quad Hcg = 75 \text{ cm}$$

(iii) Eixo tandem duplo

$$FC = 0,0132 P^{1,385} \quad Hcg = 45 \text{ cm} \quad (I-13)$$

$$FC = 0,0168 P^{1,387} \quad Hcg = 75 \text{ cm}$$

onde:

P - carga total do eixo (tf);

Hcg - espessura da camada granular.

Estes modelos, contudo, podem estar subestimando o fator de carga (FC), uma vez que o mesmo depende do expoente do modelo para o cálculo da vida de fadiga, e o modelo utilizado, referente a ensaios a tensão controlada (eq.(I-10)), apresenta inclinação menor que a de um modelo mais realista para o desempenho do pavimento, o qual é intermediário entre tensão e deformação controlada (Fig.I.1), como é ilustrado pelo conceito do Fator Modo de MONISMITH e DEACON (16).

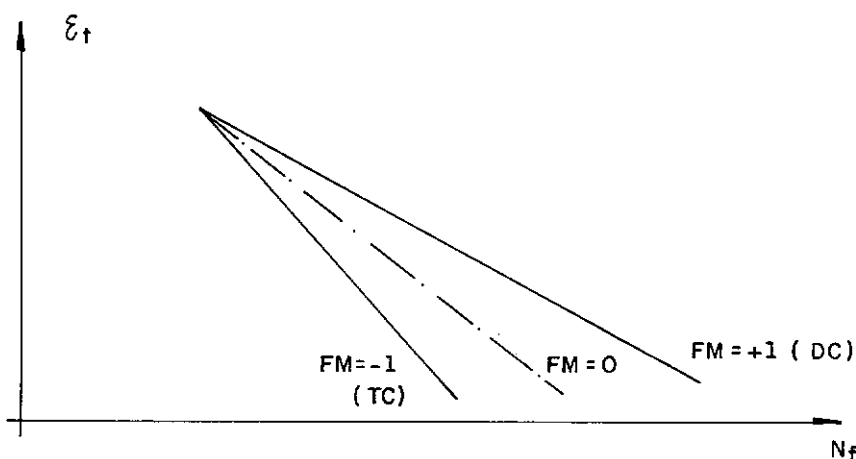


FIGURA I.1

Após analisar as estratégias que satisfazem às condições técnicas impostas pelo projetista, o programa calcula o custo total de cada uma (valor presente dos gastos a serem efetuados futuramente) e imprime as cinco estratégias (se houver) de menor custo total, bem como as de menor custo inicial. O projetista tem, então, um espectro de opções para alocação dos recursos disponíveis, podendo selecionar a mais conveniente.

A extensão desenvolvida neste trabalho permite que o pavimento original a ser analisado tenha qualquer número de camadas, cada uma delas com parâmetros de resiliência dados por um

dos seguintes modelos:

- (i) linear - $M_R = \text{constante}$
- (ii) granular - $M_R = K_1 \sigma_3^{K_2}$
- (iii) bi-linear - $M_R = f(\sigma_d) = K_2 + K_3(K_1 - \sigma_d)$, se $\sigma_d < K_1$
 $K_2 + K_4(\sigma_d - K_1)$, se $\sigma_d > K_1$

onde:

- M_R - módulo resiliente;
- σ_3 - tensão principal menor;
- σ_d - tensão desvio.

Com esta generalização, espera-se obter uma avaliação mais realista da contribuição das várias camadas do pavimento na deflexão total, com o que se chega a uma estimativa mais correta da espessura efetiva do revestimento existente, bem como a uma previsão mais exata da deflexão na superfície de cada camada de reforço aplicada, desde que os parâmetros dos modelos de resiliência das várias camadas sejam representativos dos materiais constituintes.

Além disso, a aplicação do programa original a pavimentos aeroportuários é dificultada pela necessidade de se utilizar Fatores de Equivalência de Cargas entre cada aeronave do tráfego e o eixo padrão de 80 kN. Como não se dispõe de um método consensualmente aceito para a determinação de tais fatores, a Lei de Miner, equação (I-7), será aplicada diretamente nesta versão modificada do programa, calculando-se a deflexão produzida em cada solução de reforço pela ação de cada aeronave que compõe o tráfego e substituindo-a no critério de fadiga (eq. (I-4) ou (I-5)).

No capítulo II serão apresentados e discutidos os modelos a partir dos quais o programa foi estruturado. No capítulo III será explicado como os modelos desenvolvidos se encaixam dentro do programa, descrevendo-se o fluxograma do mesmo. No capítulo IV é feita a comparação entre as deflexões previstas (com o uso dos modelos e do método de cálculo adotado) e as deflexões

medidas em campo, para uma série de pavimentos que se dispõe de dados. Nesta parte, chega-se a mais uma validação do método da resiliência para a previsão de deflexões. No capítulo V é feita uma tentativa de tornar o programa operacional, apresentando-se três procedimentos alternativos inseridos no programa, cuja escolha é função do nível de confiabilidade que o projetista tem nos parâmetros de resiliência atribuídos às várias camadas do pavimento. Finalmente, no capítulo VI são feitas algumas aplicações do programa a pavimentos rodoviários e aeroportuários.

CAPÍTULO II.

MODELOS

A maior parte dos modelos a serem apresentados referem-se à estrutura básica mostrada na Fig.II.1 constituída de revestimento em concreto asfáltico, base de modelo de resiliência granular ou linear e subleito, carregada por uma pressão normal uniforme distribuída numa área circular, simulando a carga de uma roda atuando no pavimento.

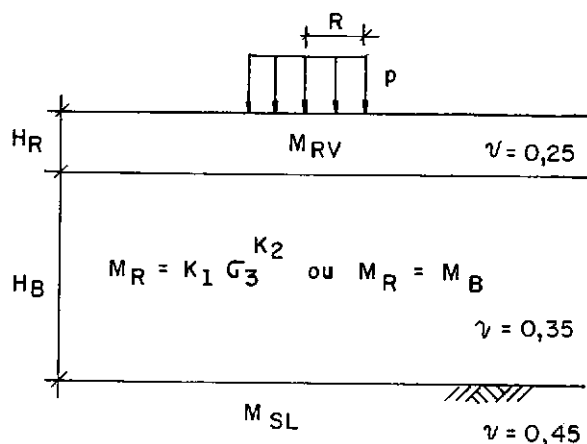


FIGURA II.1

A faixa de validade dos modelos que se referem a este perfil é mostrada no Quadro II.1.

QUADRO II.1	
$2,5 \leq H_R \leq 40 \text{ cm}$	$10 \leq H_B \leq 60 \text{ cm}$
$20.000 \leq M_{RV} \leq 80.000 \text{ Kgf/cm}^2$	$200 \leq M_B \leq 6.000 \text{ Kgf/cm}^2$
$300 \leq M_{SL} \leq 5.000 \text{ Kgf/cm}^2$	$2.500 \leq K_1 \leq 10.000 \text{ Kgf/cm}^2$
$0,4 \leq K_2 \leq 1,1$	$2,0 \leq Q \leq 23 \text{ tf}$

II.1 - Cálculo de Deflexões

A deflexão sob a roda, obtida pelo programa FEPAYE2, pôde ser expressa na seguinte correlação:

$$D = 8,142315 \times 10^5 \cdot H_R^{-0,9672} \cdot H_B^{0,2124} \cdot M_{RV}^{-0,4414} \cdot M_{SL}^{-0,3312} \cdot K_1^{-0,2243} \cdot K_2^{0,6817} \cdot Q^{0,8779} \quad (II-1)$$

$$R^2 = 0,970 \quad 146 \text{ pontos} \quad S = 0,1402$$

onde:

D - deflexão sob a roda (10^{-2} mm)

H_R - espessura do revestimento (cm)

H_B - espessura da base (cm)

M_{RV} - módulo resiliente do revestimento (Kgf/cm²)

M_{SL} - módulo resiliente do subleito (Kgf/cm²)

K_1, K_2 - parâmetros do modelo de resiliência para materiais granulares: $M_R = K_1 \sigma_3^{K_2}$ (Kgf/cm²)

Q - carga de roda ($= \pi R^2 p$) (tf)

Se o módulo resiliente da base for constante, ou seja, independente do estado de tensões, é igual a M_B , a deflexão pode ser calculada pelo seguinte modelo, obtido a partir do programa ELSYM5:

$$D = 2,00787 \times 10^5 \cdot H_R^{-0,7831} \cdot H_B^{0,06933} \cdot M_{RV}^{-0,2852} \cdot M_B^{-0,277} \cdot M_{SL}^{-0,4047} \cdot Q^{0,9224} \quad (II-2)$$

$$R^2 = 0,959 \quad 357 \text{ pontos} \quad S = 0,1782$$

Os modelos (II-1) e (II-2) são correlações estatísticas desenvolvidas com os resultados de uma série de perfis analisados com os programas mencionados. Os pontos que os originaram estão tabelados na Ref.17. Para testar a aceitabilidade dos modelos, pode-se usar o "Teste F", com a Distribuição F

de Snedecor. Assim, por exemplo, o modelo (II-1) pode ser testado a um nível de confiança de 99,5%:

$$F = \frac{n-p+1}{p-1} \cdot \frac{R^2}{1-R^2} = F_{(p-1), (n-p+1)}$$

$$F = \frac{146-8+1}{8-1} \cdot \frac{0,970}{1-0,970} = 642$$

Da tabela da distribuição F: $F_{7,139} = 3,08 < 642$

ou seja, o modelo (II-1) deve ser aceito a um nível de confiança de 99,5%. O intervalo de confiança para 95% é:

$$\begin{aligned} IC &= \log \hat{D} \pm t s \sqrt{1 + \frac{1}{n}} \\ &= \log \hat{D} \pm 1,657 \times s \sqrt{1 + \frac{1}{n}} \end{aligned}$$

$$\text{Eq. (II-1): } 0,58 \hat{D} \leq D \leq 1,71 \hat{D}$$

$$\text{Eq. (II-2): } 0,51 \hat{D} \leq D \leq 1,98 \hat{D}$$

Nestas expressões, \hat{D} é a deflexão estimada pelo modelo e D é o valor que se espera ser o correto a 95% de confiança.

Para sistemas de duas camadas existem duas soluções que serão adotadas neste trabalho, sendo utilizada uma ou outra dependendo da razão modular E_1/E_2 (Fig.II.2).

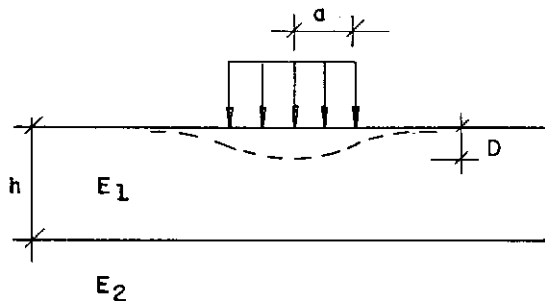


FIGURA II.2

Se $E_1/E_2 \geq 2$ é válida a solução de BURMISTER (3) para o caso de $\nu_1 = 0,2$ e $\nu_2 = 0,4$:

$$D = \frac{2pa}{E_2} I_R \quad (\text{II-3})$$

onde o fator de influência I_R é função de h/a e E_1/E_2 . Este fator foi tabelado internamente no programa para as combinações de valores:

$\frac{h}{a} = 0,0 - 0,25 - 0,5 - 0,75 - 1,0 - 1,5 - 2,0 - 2,5 - 3,0 - 3,5$
 $4,0 - 4,5$

$\frac{E_1}{E_2} = 2 - 5 - 10 - 20 - 50 - 100 - 200 - 500 - 1000 - 2000 -$
 $5000 - 10000$

em uma matriz 12X12. Os valores para combinações de h/a e E_1/E_2 intermediárias são obtidos por interpolação através dos modelos (Fig.II.3):

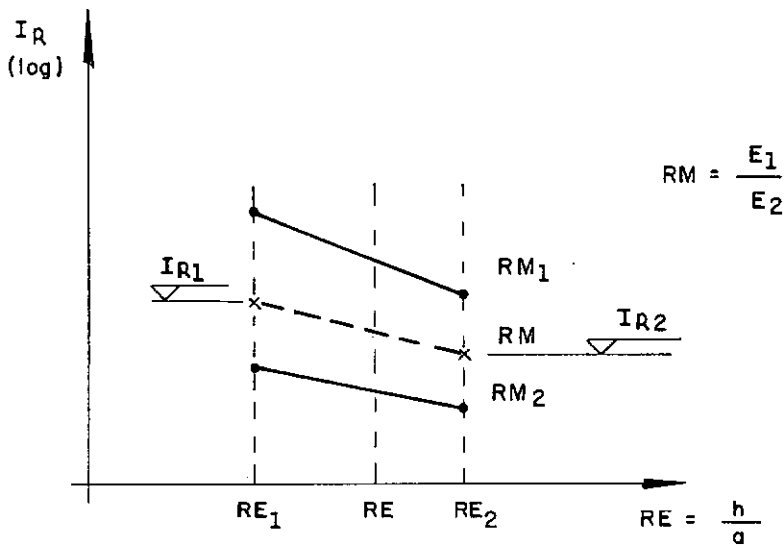


FIGURA II.3

(i) Cálculo de I_{R1} e I_{R2} :

$$\log \frac{I_R(RE_1, RM_1)}{I_{R1}} = \frac{\log \frac{I_R(RE_1, RM_1)}{I_R(RE_1, RM_2)} \cdot \log \frac{RM_1}{RM}}{\log \frac{RM_1}{RM_2}} \quad (II-4)$$

onde $i = 1$ ou 2 .

(ii) Cálculo de $I_R(RE, RM)$:

$$\frac{RE - RE_1}{RE_2 - RE_1} \cdot \log \frac{I_{R1}}{I_{R2}} = \log \frac{I_{R1}}{I_R(RE, RM)} \quad (II-5)$$

Se $E_1/E_2 < 2$ não vale a solução de BURMISTER, devido à mudança no padrão de distribuição de tensões (Fig.II.4).

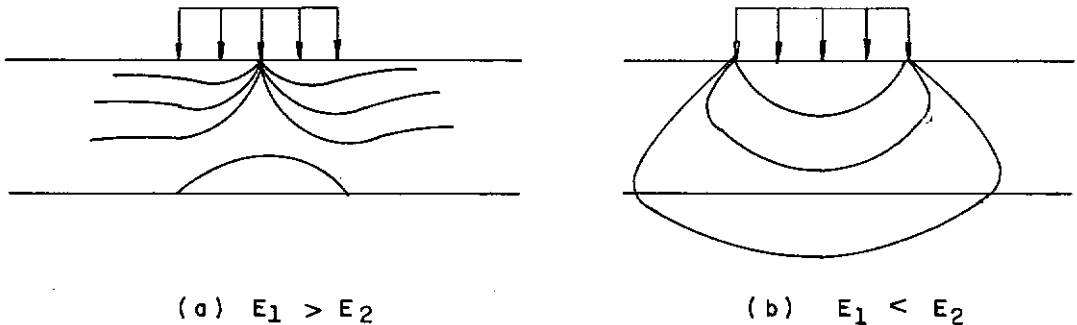


FIGURA II.4

$E_1 > E_2$ camada superior trabalha em compressão e em flexão;

$E_1 < E_2$ camada superior trabalha somente em compressão.

Fig.II.4.

Dessa forma, para $E_1/E_2 < 2$ será utilizada a solução de UESHITA e MEYERHOFF (4):

$$D = \frac{2(1-\nu_1^2)}{E_1} \text{ pa } F'_{co} \quad (II-6)$$

onde

$$F'_{co} = F'_{cor} + \frac{E_1}{E_2} (1 - F'_{cor})$$

$$F'_{cor} = \frac{1}{2(1-\nu_1^2)} I_{co}$$

sendo que I_{co} é o fator de influência de recalques para uma ca-

mada apoiada num substrato rígido. Este fator, que é função de h/a , foi tabelado no programa, sendo os valores intermediários obtidos por interpolação linear. Admitiu-se um coeficiente de Poisson de 0,4 para a camada superior.

Para sistemas de quatro camadas, conta-se com o modelo de UZAN e LYTTON (8), desenvolvido a partir do programa VESYS II ("Visco-elastic system"), o qual é apresentado abaixo:

$$D = \frac{pa}{E_4} W \quad (\text{II-7})$$

O fator de influência W é dado por:

$$\begin{aligned} \log W = & 0,2847 - 0,2361 \log(T_1/a) - 0,0898 \log(T_2/a) + \\ & - 0,2441 \log(E_1/E_4) - 0,1830 \log(E_2/E_4) + \\ & - 0,0460 \log(E_3/E_4) + \log(T_1/a) \left[- 0,2075 \log(T_1/a) + \right. \\ & + 0,2015 \log(T_2/a) + 0,0986 \log \left[1 + (T_3/a) \right] + \\ & - 0,2191 \log(E_1/E_4) + 0,1246 \log(E_2/E_4) + \\ & + 0,1020 \log(E_3/E_4) \left. \right] + \log(T_2/a) \left[- 0,1720 \log(T_2/a) + \right. \\ & + 0,1143 \log \left[1 + (T_3/a) \right] + 0,0118 \log(E_1/E_4) + \\ & - 0,1919 \log(E_2/E_4) - 0,0965 \log(E_3/E_4) \left. \right] + \\ & + \log \left[1 + (T_3/a) \right] \left[- 0,0474 \log(E_1/E_4) + \right. \\ & + 0,0220 \log(E_2/E_4) + 0,0220 \log(E_3/E_4) \left. \right] + \log(E_1/E_4) \\ & \left[- 0,03315 \log(E_1/E_4) + 0,0145 \log(E_2/E_4) + \right. \\ & + 0,0095 \log(E_3/E_4) \left. \right] + \log(E_2/E_4) \left[0,0216 \log(E_2/E_4) + \right. \\ & + 0,0074 \log(E_3/E_4) \left. \right] + 0,0300 \left[\log(E_3/E_4) \right]^2 \end{aligned}$$

Os símbolos que aparecem neste modelo estão explicados na Fig.II.5. A correlação foi obtida a partir dos seguintes valores das variáveis:

$T_{1/a} =$	0,4	1,1	2,2	
$T_{2/a} =$	0,5	1,3	2,6	
$T_{3/a} =$	0	1,3	2,6	5,2

$E_1/E_4 =$	10	60	350	
$E_2/E_4 =$	2	5	10	60 350
$E_3/E_4 =$	1	2	5	10

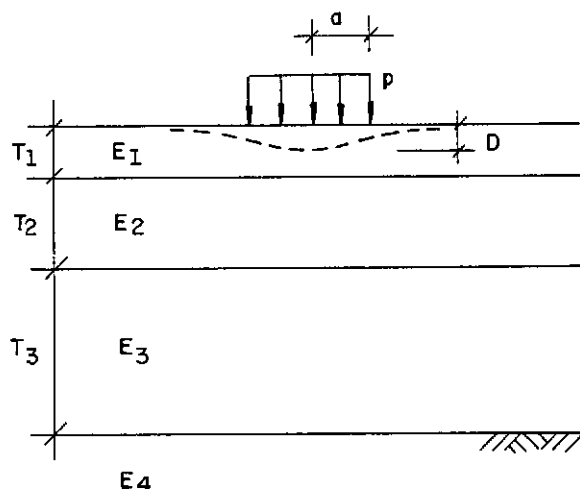


FIGURA II.5

Para se ter idéia da exatidão deste modelo, foi feita a comparação de seus resultados com aqueles dados pelo programa ELSYM5, tanto para sistemas de quatro ($T_3/a \neq 0$) como de três camadas. A Fig.II.6 mostra que o modelo é altamente confiável, ao menos dentro da faixa de variação de seus parâmetros.

Esta equação, desenvolvida para o cálculo da deflexão na superfície da camada de reforço construída sobre um pavimento de três camadas, deve ser utilizada somente quando o módulo da camada de base (E_3) for maior ou igual ao módulo do subleito (E_4). Vê-se assim que, quando este modelo foi desenvolvido, seus autores excluíram a possibilidade, bastante frequente nos pavimentos brasileiros, de que uma base granular espessa tenha módulos baixos, o que ocorre devido à redução das tensões confinantes com a profundidade. Ao mesmo tempo, se a espessura da base aumenta, a tensão desvio no subleito é reduzida, levando a que este possa apresentar módulos mais elevados que aqueles da camada de base. Este efeito ($E_4 > E_3$) pode, por outro lado, ser produzido simplesmente em virtude de o subleito ser um solo fino laterítico, cujos módulos geralmente superam os de uma base de brita graduada.

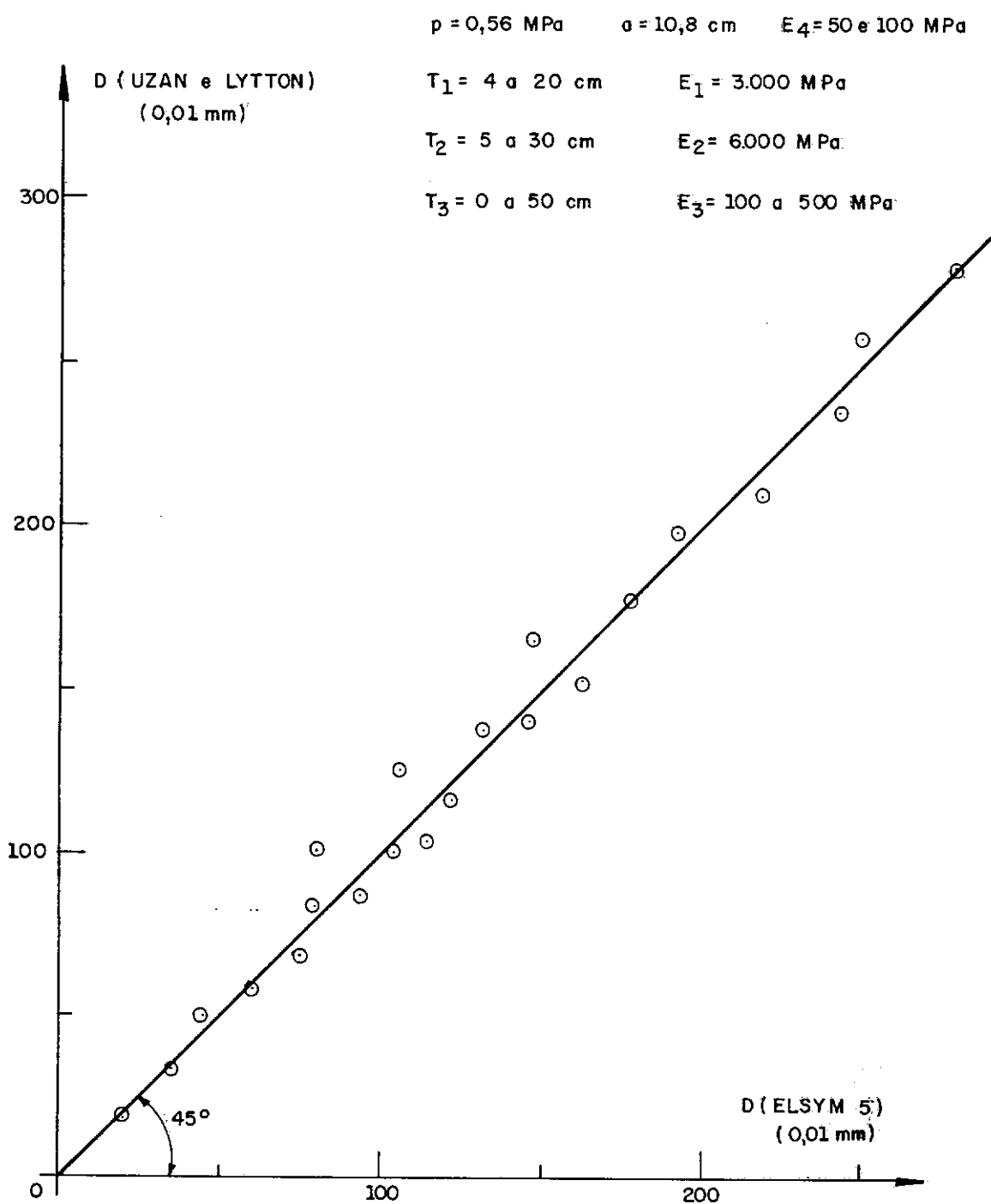


FIGURA II. 6

II.2 - Equivalência entre Camadas

Como os modelos disponíveis para o cálculo de deflexões referem-se a sistemas de duas, três ou quatro camadas, é necessário que se transforme o sistema original de n camadas num outro equivalente em termos deflectométricos. As soluções dadas aqui para este problema são aproximadas, visto não existir uma solução exata até o presente momento. Dois casos distintos podem ser delineados:

- (i) Transformação das camadas superiores do pavimento (asfálticas e cimentadas); e
- (ii) Transformação das camadas inferiores numa camada semi-infinita homogênea equivalente.

II.2.1 - Camadas Superiores (acima da base)

As camadas asfálticas e cimentadas superiores de um pavimento apresentam, via de regra, módulos maiores que os das camadas inferiores (excetua-se casos como os de um pavimento invertido ou seções com camadas de solo fino laterítico, as quais podem apresentar módulos resilientes elevados (Ref.18)). Assim, a distribuição de tensões nestas camadas obedece ao padrão da Fig.II.4 (a), ou seja, estas camadas se encontram simultaneamente em compressão e em flexão. Dessa forma, dado que o "comportamento de placa" se torna mais pronunciado quanto maior a razão modular (E_1/E_2 na Fig.II.4a), o módulo equivalente das mesmas pode ser dado aproximadamente a partir de uma média das rigidezes à flexão de duas placas. Isto é o que é feito na fórmula sugerida no Manual de Utilização do Programa DAMA2 do Instituto do Asfalto dos EUA (Ref.19):

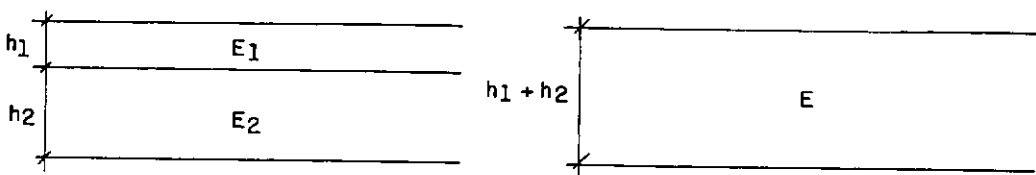


FIGURA II.6.1

$$E = \left[\frac{h_1 E_1^{1/3} + h_2 E_2^{1/3}}{h_1 + h_2} \right]^3 \quad (\text{II-8})$$

Como se sabe, o momento fletor atuante numa placa é dado por (Ref.7, pág.83):

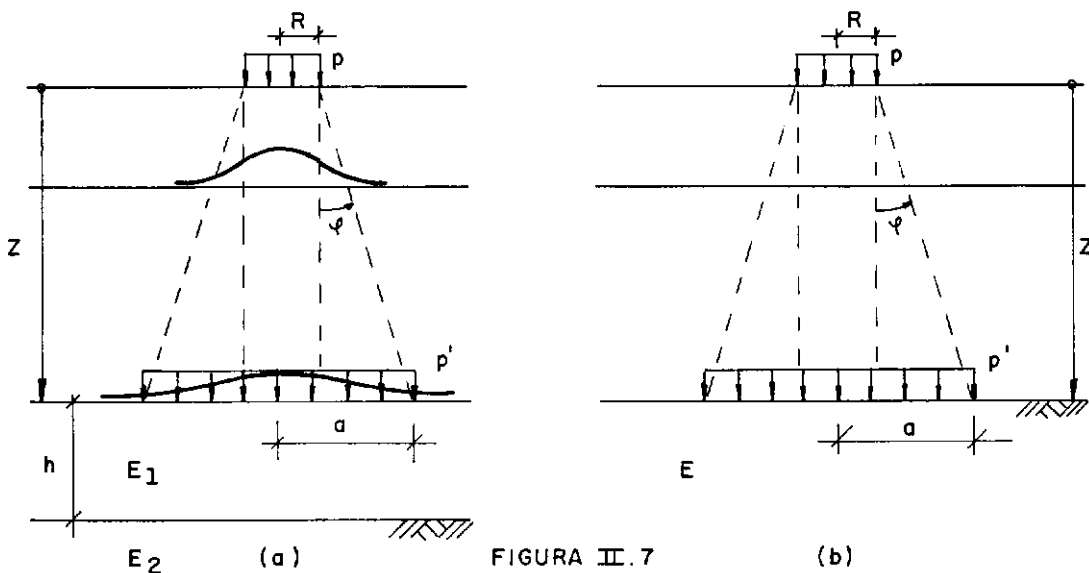
$$M_x = \frac{E h^3}{12(1-\nu^2)} \cdot \frac{d^2 w}{dx^2} \quad (\text{II-9})$$

o que mostra ser a eq.(II-8) uma boa aproximação, se as camadas que estão sendo tranformadas realmente desempenharem papel de flexão na estrutura do pavimento. Admite-se aqui ser este o caso das camadas asfálticas e cimentadas superiores num pavimento flexível ou semi-rígido.

II.2.2 - Camadas Inferiores (abaixo da base)

Seja o problema de tranformar uma sub-base apoiada diretamente no subleito em um semi-espço homogêneo elástico de mesma compressibilidade.

As tensões verticais aplicadas no topo dessa sub-base distribuem-se radialmente na conhecida forma de sino, sendo que, à medida que aumenta a profundidade, a tensão máxima diminui e aumenta o raio em que se distribui a tensão média (uniforme), e quivalente estaticamente à distribuição real (Fig.II.7(a)).



Dessa forma, tudo se passa como se no topo da sub-base (à profundidade Z) atuasse uma pressão vertical uniforme distribuída numa área circular, de valor p' (menor que p) e raio:

$$a = R + Z \cdot \operatorname{tg} \varphi \quad (\text{II-10})$$

onde φ é o ângulo que define o tronco de cone sob a carga aplicada na superfície do pavimento onde atuam as tensões verticais $'$ induzidas por essa carga ao longo da seção do pavimento. O ângulo φ é variável de acordo com a rigidez da estrutura do pavimento, situando-se na faixa de 30° a 45° (Ref.20, pág.206). Neste trabalho, adotou-se $\varphi = 30^\circ$. Uma vez calculado o raio a , o módulo equivalente E será aquele que levar a uma mesma deflexão máxima no centro da carga circular de pressão p' e raio a (Fig.II.8). Assim, se $E_1 \geq 2 E_2$ (solução de BURMISTER):

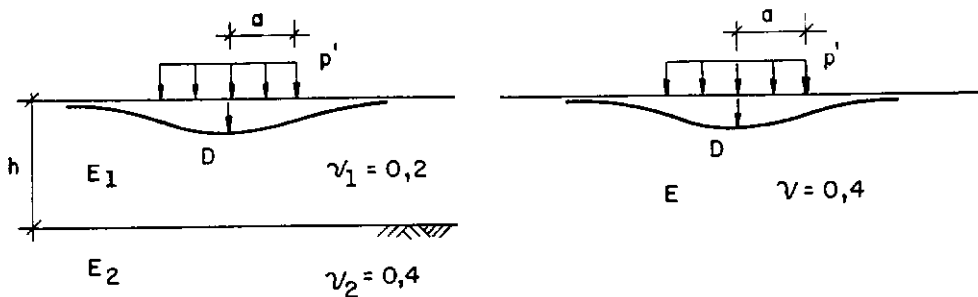


FIGURA II.8

$$D = \frac{2p'a}{E_2} I_R \left(\frac{h}{a}, \frac{E_1}{E_2} \right) = 1,68 \frac{p'a}{E}$$

$$E = 0,84 \frac{E_2}{I_R \left(\frac{h}{a}, \frac{E_1}{E_2} \right)} \quad (\text{II-11})$$

Da mesma forma, se $E_1 < 2 E_2$ (solução de UESHITA e MEYERHOFF):

$$D = \frac{1,68}{E_1} p'a F'_{CO} = 1,68 \frac{p'a}{E}$$

$$E = \frac{E_1}{F'_{CO}} \quad (\text{II-12})$$

Pelas equações (II-11) e (II-12) vê-se que o efeito do valor calculado para \underline{a} é indireto sobre o valor de E , não sendo este muito sensível a variações de φ entre 30° e 45° .

II.3 - Módulo Equivalente de Bases Granulares

Seja o pavimento constituído por revestimento asfáltico, base granular e subleito (Fig.II.1). A base granular, com módulo dependente da tensão principal menor de acordo com o modelo de resiliência: $M_R = K_1 \sigma_3^K$, vai apresentar, consequentemente, módulos distintos em pontos diferentes da camada, devido à distribuição desuniforme da tensão σ_3 produzida pela carga aplicada (Fig.II.4).

Um antigo problema é o de se determinar um módulo equivalente para os materiais granulares de modo a se poder efetuar o cálculo de tensões e deformações através da teoria de camadas elásticas lineares. Efetuando-se a determinação do módulo constante da base no programa ELSYM5 de modo a se reproduzir a deflexão máxima sob a roda calculada pelo programa FEPAVE2 não-linear (isto é, com modelo para a base dado por: $M_R = K_1 \sigma_3^K$) verificou-se que o módulo obtido pode ser muito diferente daquele que reproduz a tensão vertical no topo do subleito, no eixo da carga, ou daquele que reproduz a tensão horizontal de tração na base do revestimento (Ref.17). Conclui-se, portanto, que não existe um módulo equivalente único para os materiais granulares que seguem o modelo de resiliência $M_R = K_1 \sigma_3^K$, mas um módulo específico para cada critério particular de equivalência que for adotado.

O módulo equivalente foi determinado por comparação entre os resultados dos programas FEPAVE2 (não-linear) e ELSYM5 (linear) para o perfil da Fig.II.1 e abrangendo a faixa de variação dos parâmetros da estrutura constantes do Quadro II.1. Os resultados obtidos puderam ser expressos nas seguintes correlações (Ref.17):

- (i) Módulo Equivalente que reproduz a deflexão no centro da roda:

$$\bar{M}_{RD} = 1,8007 \times 10^{-2} \cdot H_R^{0,663} \cdot H_B^{-0,7434} \cdot M_{RV}^{0,6924} \cdot M_{SL}^{-0,4577} \cdot Q^{0,3063} \cdot K_1^{0,7814} \cdot K_2^{-2,293} \quad (II-13)$$

$$R^2 = 0,828 \quad 119 \text{ pontos} \quad S = 0,4637$$

(ii) Módulo Equivalente que reproduz a tensão vertical no topo do subleito, no centro da roda:

$$\bar{M}_{RV} = 9,4137 \times 10^{-2} \cdot H_R^{1,3} \cdot H_B^{-0,7711} \cdot M_{RV}^{1,031} \cdot M_{SL}^{0,4303} \cdot Q^{-0,2047} \cdot K_1^{-0,3774} \cdot K_2^{1,018} \quad (II-14)$$

$$R^2 = 0,829 \quad 116 \text{ pontos} \quad S = 0,392$$

(iii) Módulo Equivalente que reproduz a tensão horizontal de tração na base do revestimento, no centro da roda:

$$\bar{M}_{RT} = 1,3031 \times 10^{-3} \cdot H_R^{0,1625} \cdot H_B^{-0,4426} \cdot M_{RV}^{0,4} \cdot M_{SL}^{0,2805} \cdot Q^{0,1264} \cdot K_1^{0,8029} \cdot K_2^{-1,858} \quad (II-15)$$

$$R^2 = 0,595 \quad 116 \text{ pontos} \quad S = 0,4937$$

A respeito do módulo equivalente de bases granulares, deve-se observar que este é apenas um expediente de cálculo, empregado com a finalidade de se utilizar um sistema elástico-linear no cálculo de um determinado efeito correspondente ao que é calculado pelo sistema não-linear elástico. Não se deve, portanto, atribuir maior significado a este conceito. Como ilustração, tem-se o caso de que, se utilizarmos o módulo equivalente para a reprodução da deflexão máxima no centro da roda do sistema elástico não-linear, isto não garantirá que as linhas deformadas de superfície sejam iguais, o que ocorre pronunciadamente para cargas elevadas como as de aeronaves.

Os módulos equivalentes dados pelas equações (II-13), (II-14) e (II-15) foram determinados pela comparação dos resultados de um sistema elástico-linear (ELSYM5) com um programa de elementos finitos (FEPAVE2), uma vez que o método de análise dos elementos finitos é o único, até o momento, capaz de permitir a variação do módulo de uma base granular tanto vertical como horizontalmente, de acordo com o modelo

$$M_R = K_1 \sigma_3^{K_2}$$

Outra maneira em que isto pode ser feito é incorporando-se o comportamento não-linear diretamente no sistema linear pelo uso de um processo iterativo: divide-se a camada de base em subcamadas, atribuindo-se diferentes módulos a cada uma delas. Com as tensões calculadas em cada uma pela análise linear, recalcula-se o módulo de cada subcamada pelo modelo

$M_R = K_1 \sigma_3^{K_2}$. O processo é repetido até a convergência dos módulos calculados em cada etapa. Este procedimento tem a vantagem de que a heterogeneidade radial da camada granular não é levada em conta. SMITH e WITCZAK (21) adotaram este método para a determinação do módulo equivalente de bases granulares que seguem o modelo $M_R = K_1 \theta^{K_2}$, onde θ é o primeiro invariante de tensões, quando $K_2 = 0,5$ e a carga atuante é de 40 kN numa roda simples:

- (i) Módulo equivalente que reproduz a deformação de tração na base do revestimento

$$\bar{M}_R (\epsilon_t) = 122,18 \cdot H_R^{-0,511} \cdot H_B^{-0,008} \cdot M_{RV}^{-0,155} \cdot M_{SL}^{0,279} \cdot K_1^{0,888} \quad (II-16)$$

$$R^2 = 0,958 \quad 324 \text{ pontos}$$

- (ii) Módulo equivalente que reproduz a deformação vertical de compressão no topo do subleito

$$\bar{M}_R (\epsilon_v) = 81,06 \cdot H_R^{-0,430} \cdot H_B^{-0,073} \cdot M_{RV}^{-0,122} \cdot M_{SL}^{0,294} \cdot K_1^{0,848} \quad (II-17)$$

$$R^2 = 0,942 \quad 324 \text{ pontos}$$

Deve-se observar que os modelos (II-16) e (II-17) têm aplicação restrita a pavimentos rodoviários, uma vez que foram desenvolvidos apenas para uma carga de roda de 40 kN e pressão de inflação de 483 kPa. Além disso, sua comparação com os modelos (II-13), (II-14) e (II-15) tem pouco significado, já que cada modelo foi desenvolvido de acordo com um critério particular, diferente dos demais.

II.4 - Cálculo de Tensões

As mesmas estruturas delimitadas no Quadro II.1, analisadas pelo programa FEPAVE2 não-linear, tiveram computadas as tensões críticas que ocorrem no perfil no eixo central da carga circular. Estas tensões puderam ser correlacionadas com os parâmetros que definem a estrutura e com a carga de roda atuante (Ref.17):

- (i) Tensão principal menor horizontal de compressão no topo do subleito:

$$\sigma_3 = 28,1346 \cdot H_R^{-0,6789} \cdot H_B^{-1,163} \cdot M_{RV}^{-0,2497} \cdot M_{SL}^{0,4575} \cdot K_1^{-0,209} \cdot K_2^{0,4933} \cdot Q^{0,7935} \quad (II-18)$$

$$R^2 = 0,924 \quad 120 \text{ pontos} \quad S = 0,289$$

- (ii) Tensão desvio ($\sigma_1 - \sigma_3$) vertical no topo subleito:

$$\sigma_d = 121,2676 \cdot H_R^{-1,158} \cdot H_B^{-0,99} \cdot M_{RV}^{-0,5252} \cdot M_{SL}^{0,279} \cdot K_1^{0,2011} \cdot K_2^{-0,5415} \cdot Q^{1,053} \quad (II-19)$$

$$R^2 = 0,977 \quad 116 \text{ pontos} \quad S = 0,160$$

- (iii) Tensão horizontal de tração na base do revestimento

$$\sigma_t = 308,5858 \cdot H_R^{-1,25} \cdot H_B^{0,1541} \cdot M_{RV}^{0,214} \cdot M_{SL}^{-0,1562} \cdot K_1^{-0,2477} \cdot K_2^{0,5157} \cdot Q^{0,6765} \quad (II-20)$$

$$R^2 = 0,898 \quad 116 \text{ pontos} \quad S = 0,1906$$

Analogamente, as análises pelo ELSYM5 forneceram estas mesmas tensões quando o módulo da base é constante (estrutura linear):

(i) Tensão principal menor horizontal de compressão no topo do subleito:

$$\sigma_3 = 70,31 \cdot H_R^{-1,309} \cdot H_B^{-0,789} \cdot M_{RV}^{-0,7494} \cdot M_{SL}^{0,249} \cdot M_B^{0,4846} \cdot Q^{0,8927} \quad (II-21)$$

$$R^2 = 0,943 \quad 116 \text{ pontos} \quad S = 0,1705$$

(ii) Tensão desvio ($\sigma_1 - \sigma_3$) vertical no topo do subleito:

$$\sigma_d = 34,503 \cdot H_R^{-0,4665} \cdot H_B^{-1,40} \cdot M_{RV}^{0,0233} \cdot M_{SL}^{0,5079} \cdot M_B^{-0,5319} \cdot Q^{0,9441} \quad (II-22)$$

$$R^2 = 0,985 \quad 116 \text{ pontos} \quad S = 0,1503$$

(iii) Tensão horizontal de tração na base do revestimento

$$\sigma_t = 40,48777 \cdot H_R^{-1,2} \cdot H_B^{0,01734} \cdot M_{RV}^{0,3373} \cdot M_B^{-0,3084} \cdot M_{SL}^{-0,06972} \cdot Q^{0,7155} \quad (II-23)$$

$$R^2 = 0,971 \quad 116 \text{ pontos} \quad S = 0,1044$$

Deve-se observar que, como não se dispõe de dados de

tensões medidas em campo, não se garante que os valores calculados por essas equações correspondam às tensões geradas quando da passagem de um veículo. Tudo o que se sabe é que a deformada de superfície calculada pelo FEPAVE2 concorda com a que é medida em campo com a viga Benkelman (Ref.1). Contudo, isto não importa para o presente trabalho, uma vez que, como se verá no capítulo III, estes modelos serão utilizados apenas para o cálculo do módulo das camadas de modelo tensão-deformação não-linear, num procedimento que é essencialmente o mesmo que o FEPAVE2 realiza ao calcular o módulo de cada elemento. Como a estrutura obtida será utilizada apenas para o cálculo de deflexões, o método é válido, tendo em vista a concordância das deflexões do FEPAVE2 com as de campo (Ref.1).

II.5 - Carga de Roda Simples Equivalente

Todos os modelos apresentados para o cálculo de deflexões e tensões numa estrutura de pavimento referem-se a uma carga de roda simples. Contudo, as cargas de eixo rodoviárias que influenciam o projeto e o desempenho dos pavimentos, bem como os trens-de-pouso das aeronaves pesadas que operam num aeródromo, são configurações de mais de uma roda, situadas suficientemente próximas umas às outras de modo a que seus efeitos no pavimento se superponham.

Para solucionar este problema, surgiu o conceito da "Carga de Roda Simples Equivalente" (ESWL), definida como a carga de uma única roda que provoca a ocorrência do valor de um certo parâmetro (tensão, deformação, deflexão ou efeito destrutivo), num certo ponto do pavimento, igual àquele produzido por uma configuração múltipla de cargas de roda, naquele mesmo ponto do pavimento (Ref.7).

Os parâmetros selecionados para a determinação da ESWL classificam-se em duas categorias:

- (i) Tensões, deformações ou deflexões calculadas teoricamente ou medidas experimentalmente;
- (ii) Parâmetros que medem algum efeito destrutivo como trincamento, nível de serventia ou idên

ticas condições de ruptura.

A respeito disso, deve-se observar que a ESWL é apenas um conceito operacional, utilizado intermediariamente na estimativa de um certo efeito produzido por uma configuração múltipla de rodas e para o qual se dispõe de modelos apenas para roda simples. Assim, a ESWL determinada de acordo com um determinado critério só terá significado ao ser utilizada na estimativa daquele parâmetro para o qual foi calculada, e no ponto específico da estrutura do pavimento.

Para este trabalho, como interessa o cálculo da deflexão produzida na superfície do pavimento no centro da roda, bem como as tensões geradas na interface entre as camadas no eixo central da roda, a ESWL será determinada de modo a produzir o efeito correspondente àquele no centro de uma das rodas devido à ação simultânea de todas as demais. Dessa forma, as cargas de roda simples equivalente aqui determinadas visam unicamente à sua utilização no cálculo das deflexões e tensões através dos modelos (II-1) a (II-7) e (II-18) a (II-23), ou seja, no cálculo do efeito correspondente produzido no eixo central de uma roda selecionada da configuração múltipla quando atuam também as demais rodas.

II.5.1 - Carga de roda simples equivalente em termos da de
flexão no centro de uma das rodas e na superfície
do pavimento

Seja a determinação da carga atuante na roda simples da Fig.II.9(b) que produza a mesma deflexão no seu eixo central que a deflexão que ocorre sob uma das rodas da roda dupla mostrada na Fig.II.9(a).

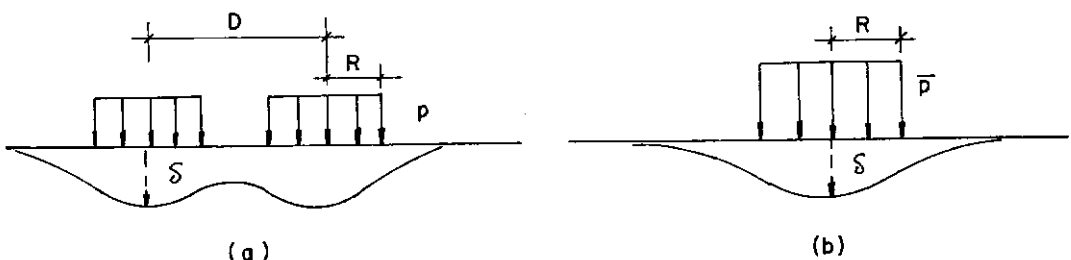


FIGURA II.9

Mantendo-se o mesmo raio da área de contato (R), o problema consiste em se determinar a pressão de contato (\bar{p}) que leve à ESWL (\bar{Q}) para mesma deflexão sob a roda..A ESWL será, então, calculada por:

$$\bar{Q} = \bar{p} \cdot (\pi R^2) \quad (\text{II-24})$$

Esta determinação foi feita através do programa ELSYM5, variando-se a distância centro-a-centro entre as rodas (D) e o raio da área de contato (R). Verificou-se que a ESWL (\bar{Q}) é função da razão D/R e não somente de D ou R isoladamente, mantidos os demais parâmetros. Isto se explica por uma similitude geométrica: duas rodas com pequena distância centro-a-centro e com raio pequeno exercem influência uma sobre a outra de mesma intensidade que duas rodas muito afastadas mas com raio grande, de modo que a razão D/R se mantenha (Fig.II.10).

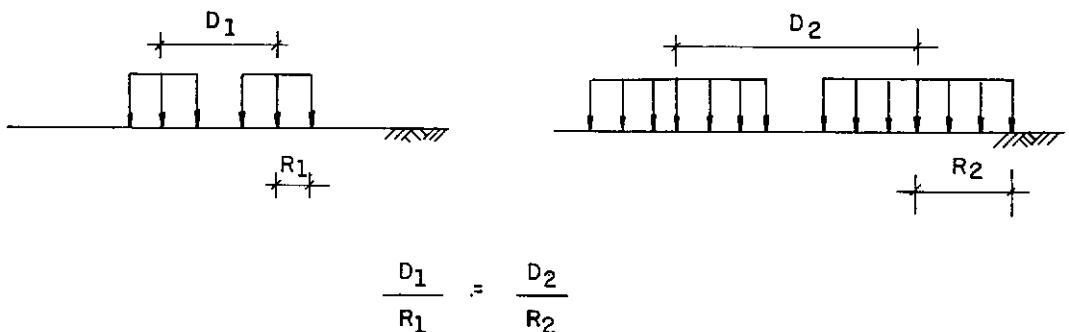


FIGURA II.10

A carga de roda simples equivalente será calculada pela equação:

$$\bar{Q} = Q + Q.FI \quad (\text{II-25})$$

onde Q é a carga que atua numa roda e FI é o fator de influência, o qual traduz a contribuição da outra roda à ESWL. Assim, soma-se à carga atuante na roda que está sobre o ponto onde se deseja reproduzir a deflexão pela ESWL ($=Q$) a parcela de contribuição da roda vizinha ($=Q.FI$). Este fator deve ser tal que, quando a distância centro-a-centro entre as rodas for nula ($D/R=0$), ou seja, quando houver completa superposição entre as áreas de contato, a ESWL seja $\bar{Q}=2Q$. Ao mesmo tempo, quando elas

se afastarem, o fator deve diminuir, tendendo a zero quando a razão D/R tender a infinito. Uma função que satisfaz a estes requisitos é:

$$FI = e^{-\left(\frac{D}{R}\right)\eta} \quad (II-26)$$

pois, para: $D/R = 0 \Rightarrow FI = 1$

$D/R \rightarrow \infty \Rightarrow FI \rightarrow 0$

Finalmente, para a determinação de \bar{Q} resta o cálculo do fator de equivalência η . Este fator foi determinado através do programa ELSYM5 variando-se Q , D/R e o perfil do pavimento, considerado de três camadas. Verificou-se acentuada influência da estrutura do pavimento no valor de η , além de uma pequena influência da própria carga de roda da configuração. Assim, optou-se por levar em conta este efeito através da análise de uma série de estruturas e cargas de roda, que abrangeram a faixa de limitada no Quadro II.3.

QUADRO II.3	
$10 \leq H_R \leq 30 \text{ cm}$	$20 \leq H_B \leq 40 \text{ cm}$
$30.000 \leq M_{RV} \leq 60.000 \text{ Kgf/cm}^2$	$400 \leq M_B \leq 5.000 \text{ Kgf/cm}^2$
$500 \leq M_{SL} \leq 3.000 \text{ Kgf/cm}^2$	$5,64 \leq Q \leq 22,7 \text{ tf}$

Os valores obtidos para η puderam ser expressos numa correlação múltipla com as variáveis da estrutura e com a carga de roda, sendo que a espessura da base (H_B) não teve influência significativa, ao menos na faixa analisada:

$$\eta = 4,8793 \cdot H_R^{-0,8058} \cdot M_{RV}^{-0,3593} \cdot M_B^{-0,07506} \cdot M_{SL}^{0,432} \cdot Q^{0,1716} \quad (II-27)$$

$$R^2 = 0,949 \quad 48 \text{ pontos} \quad S = 0,157$$

Os pontos que definiram este modelo encontram-se tabelados na Ref.(17).

A equação para o cálculo da ESWL que reproduz a deflexão no centro de uma das rodas de uma configuração múltipla (Fig.II.11) de n rodas fica, portanto:

$$\bar{Q} = Q. \left[1 + \sum_{i=1}^{n-1} e^{-\left(\frac{D_i}{R}\right)^n} \right] \quad (\text{II-28})$$

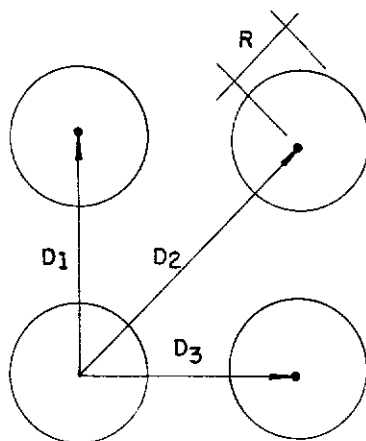


FIGURA II. 11

II.5.2 - Carga de roda simples equivalente em termos da tensão vertical no centro de uma das rodas e na interface com o subleito

Quando do cálculo das tensões produzidas no centro da roda e na interface com o subleito pelas equações (II-18), (II-19), (II-21) e (II-22), interessa a carga de roda que produza a mesma tensão vertical que todas as rodas, no centro de uma delas.

Esta determinação foi feita através do programa ELSYM5 variando-se a distância entre as rodas (D), a profundidade do subleito (Z) e os módulos e espessuras de um perfil de pavimento de três camadas, abrangendo as mesmas faixas do Quadro II.3.

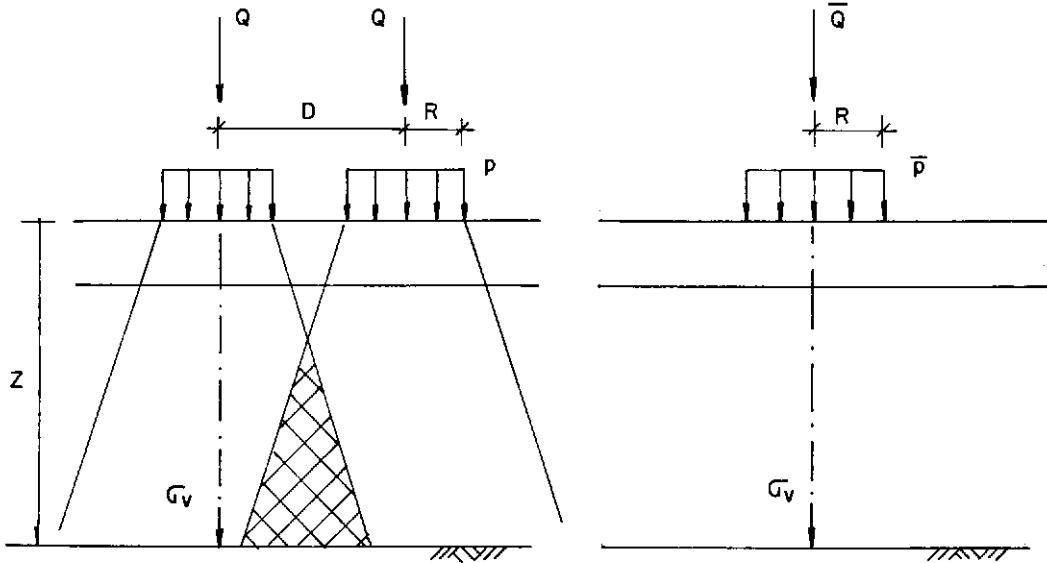


FIGURA II.12

Verificou-se que a ESWL (\bar{Q}) diminuía com o aumento da distância (D) e aumentava com o aumento da profundidade do subleito (Z), de modo tal que a variável mais importante era a razão D/Z . A ESWL foi escrita novamente como na eq.(II-25):

$$\bar{Q} = Q + Q.FI$$

onde o novo fator de influência FI deve se anular quando a profundidade Z tender a zero (elimina-se a interferência ou interpenetração entre os bulbos de tensão das duas cargas-Fig.II.12) e ser igual a um quando as duas áreas carregadas se superpuserem totalmente ($D=0$). Assim, este fator pode ser dado por:

$$FI = e^{-\left(\frac{D}{Z}\right)\zeta} \quad (II-29)$$

sendo que o fator de influência ζ foi determinado através do ELSYM5 para os mesmos casos do Quadro II.3, encontrando-se sua dependência com a estrutura do pavimento, a qual pôde ser traduzida na equação (Ref.17):

$$\zeta = 4,1787 \cdot H_R^{-0,4976} \cdot H_B^{0,06373} \cdot M_{RV}^{-0,2895} \cdot M_B^{0,06548} \cdot M_{SL}^{0,2281} \cdot Q^{0,185} \quad (II-30)$$

$$R^2 = 0,857 \quad 72 \text{ pontos} \quad S = 0,1655$$

A equação para o cálculo da ESWL de uma configuração' de n rodas pode ser escrita, então, como:

$$\bar{Q} = Q \cdot \left[1 + \sum_{i=1}^{n-1} e^{-\left(\frac{D_i}{Z}\right)} \zeta \right] \quad (II-31)$$

onde Z é a profundidade do subleito, igual a $H_R + H_B$.

II.5.3 - Carga de roda simples equivalente em termos da tensão horizontal de tração no centro de uma das rodas e na base do revestimento

Para este caso valem todas as observações feitas para a ESWL em termos da tensão vertical no subleito, podendo-se utilizar equação análoga:

$$\bar{Q} = Q \cdot \left[1 + \sum_{i=1}^{n-1} e^{-\left(\frac{D_i}{Z}\right)} \varphi \right] \quad (II-32)$$

sendo Z a profundidade onde está o ponto de equivalência da tensão horizontal máxima, igual a H_R (espessura do revestimento) . O fator φ variou relativamente pouco com a estrutura do pavimento, na faixa analisada, ficando em torno de 0,6 em média. Para maior precisão, a sua variação com a estrutura pôde ser expressa por (Ref.17):

$$\varphi = 0,841474 \cdot H_R^{0,2107} \cdot M_{RV}^{-0,2682} \cdot M_B^{0,06993} \cdot M_{SL}^{0,1951} \quad (II-33)$$

$$R^2 = 0,970 \quad 16 \text{ pontos} \quad S = 0,04879$$

Como observação final, deve-se reiterar que as cargas de roda simples equivalente aqui apresentadas têm sua aplicação restrita aos fins para os quais foram determinadas, ou seja, para o cálculo de deflexões ou tensões em pontos específicos sob o centro de uma das rodas da configuração. Cada método de projeto deve determinar a ESWL correspondente ao parâmetro que define o seu critério de dimensionamento, seja ele tensões, deformações, deflexões ou efeitos destrutivos como o trincamento e o nível de serventia.

II.6 - Redução do Módulo Efetivo do Revestimento com o Trincamento

II.6.1 - Considerações Gerais

Com o processo de trincamento que inevitavelmente ocorre nos pavimentos, seja devido a efeitos climáticos ou pela ação repetida das cargas do tráfego, o revestimento perde parte de sua capacidade estrutural de absorver as tensões induzidas pelas cargas de roda e de reduzir as deflexões, uma vez que foram desfeitas as ligações ou a coesão da mistura asfáltica ao longo de planos verticais que atravessam total ou parcialmente a sua espessura. Com isto, a camada vai deixando de funcionar como uma placa continuamente apoiada submetida a compressão vertical e a flexão, comportando-se cada vez mais somente em compressão e perdendo parte da rigidez à flexão em consequência da redução na transmissão dos esforços cisalhantes ao longo dos planos fraturados que constituem as trincas. Esta alteração macro-estrutural da mistura está associada intimamente a uma redução no seu módulo resiliente em tração (ou em flexão), embora o seu módulo em compressão confinada permaneça quase inalterado. Esta situação só pode ser simulada adequadamente por um programa de elementos finitos, onde o módulo elástico é o da mistura íntegra e as trincas são modeladas por duplicação dos nós e elementos especiais nas suas extremidades (Ref.22).

Um modelo provisório para este processo pode ser obtido supondo-se que a camada com certo grau de trincamento possa ser simulada por uma camada íntegra com um "módulo efetivo" cor

respondente. Supõe-se, assim, a existência de uma relação unívoca entre o grau de trincamento (traduzido pela percentagem de área trincada-TR(%)) e a redução do módulo efetivo da camada, traduzida pela relação: M_{Ref}/M_{Ro} , onde M_{Ref} é o módulo efetivo e M_{Ro} é o módulo da camada íntegra (isto é, com TR = 0).

À medida que a desagregação associada ao trincamento progride, a camada tende a se comportar como uma camada granular. Este limite somente seria atingido quando a desagregação da mistura fosse completa, com total destruição das ligações entre os agregados. Assim, mesmo para 100% de área trincada, ainda existe coesão suficiente na mistura para que seu módulo efetivo como camada de revestimento seja maior que o de uma camada puramente granular. Na realidade, este módulo deve ser uma função crescente do módulo da mistura íntegra, ou seja, do módulo medido em um corpo-de-prova não-fissurado extraído do pavimento (M_{Ro}), o qual reflete a influência do tipo de ligante betuminoso utilizado e da idade do mesmo, já com o efeito do endurecimento provocado pela oxidação que ocorre em campo. Pode-se escrever, portanto:

$$M_{Ref} \text{ (TR=100\%)} = K.M_{Ro} \quad (II-34)$$

onde a fração K deve ser avaliada. Como não se dispõe, até a presente data, de algum método para a determinação de K, esta será escolhida de modo que o modelo final a ser obtido esteja a favor da segurança. Para tanto, considere-se a estrutura mostrada na Fig.II.13(a), constituída por uma camada de 40 cm de brita graduada apoiada num subleito Tipo II (de acordo com a classificação na pág. 8).

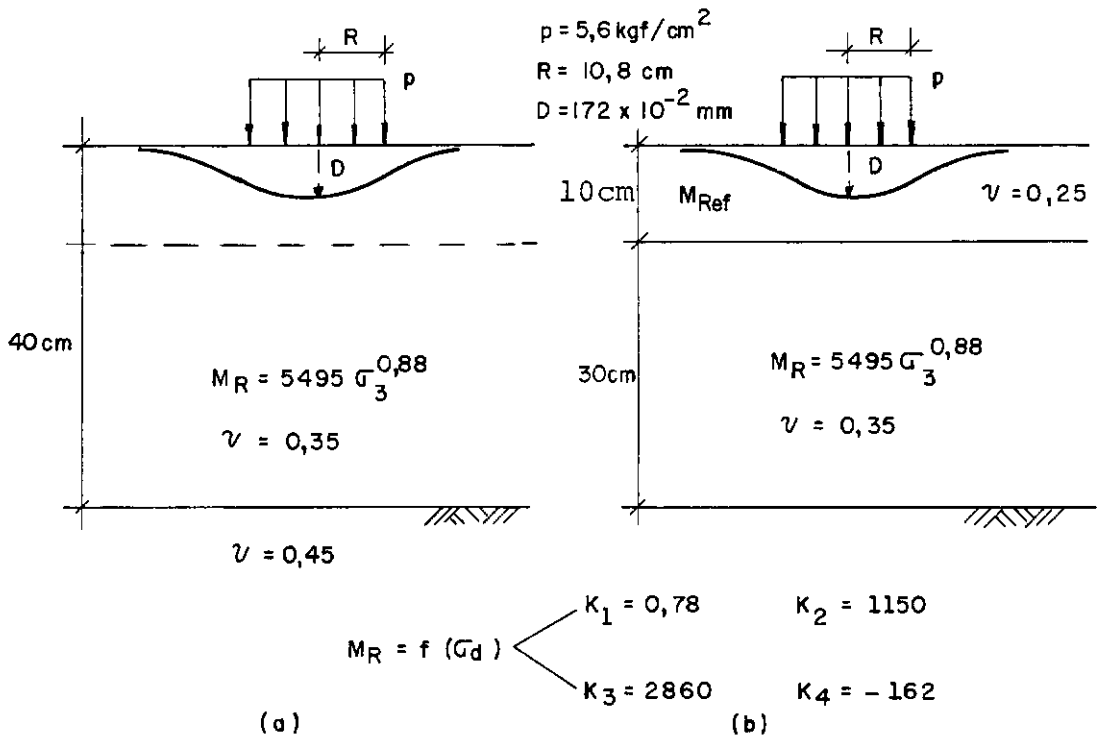


FIGURA II.13

O perfil mostrado procura simular um pavimento com 30 cm de base granular e 10 cm de revestimento, sendo que este último se encontra em estado de desagregação total. Assim estas duas camadas se comportam como uma camada granular única, de 40 cm de espessura. A deflexão sob uma carga de roda simples igual a 20 kN, calculada pelo programa FEPAVE2, é de $172 \times 10^{-2} \text{ mm}$. O módulo que essa camada de 10 cm deveria ter para que se obtivesse a mesma deflexão é de 470 Kgf/cm^2 (47 MPa), como ilustrado na Fig.II.13(b), na qual se mostra a estrutura simulada no FEPAVE2.

O módulo resiliente do concreto asfáltico íntegro se encontra na faixa de 2.000 a 5.000 MPa, para misturas feitas em laboratório e projetadas de acordo com as especificações do DNER, nos tempos de solicitação e temperaturas médias características das condições brasileiras (Ref.23). Seu valor particular dentro desta faixa depende do tipo de ligante betuminoso. Valores mais elevados, contudo, podem ocorrer no campo, em consequência dos processos de intemperização.

Do exposto acima, pode-se concluir que o módulo efetivo do revestimento asfáltico totalmente desagregado é da ordem

de um centésimo do módulo da mistura íntegra. Dessa forma, se adotarmos o fator K da eq. (II-34) como $K = 1/100$, estaremos a favor da segurança, uma vez que 100% de área trincada é uma situação que ainda se encontra longe da desagregação total da mistura.

A mistura íntegra apresenta resistência à tração e à compressão. Em consequência, a camada não-trincada se comportará simultaneamente em flexão e em compressão. Sua distribuição de tensões obedecerá ao padrão da Fig. II.4(a) e parte de sua capacidade de reduzir as deflexões terá origem na sua rigidez à flexão, a outra parcela estando associada a seu módulo em compressão.

Por outro lado, a camada que sofreu desagregação total não terá resistência à tração, sendo que seu módulo em compressão confinada será aproximadamente igual ao da mistura íntegra. Assim, esta camada terá distribuição de tensões segundo o padrão da Fig. II.4(b) e sua capacidade residual de reduzir as deflexões terá origem unicamente no seu módulo em compressão, já que sua rigidez à flexão será nula. Ao mesmo tempo, uma camada com um certo grau de trincamento poderá ser ainda capaz de reduzir as deflexões do pavimento (em relação à estrutura sem o revestimento), desde que seu módulo efetivo seja maior que os módulos existentes na camada de base do pavimento. Isto mostra a importância de se tentar uma estimativa do módulo efetivo da camada de revestimento em função da sua percentagem de área trincada, já que assim se poderá levar em conta sua capacidade residual de reduzir as deflexões do pavimento no instante de se prever a deflexão numa segunda camada de reforço, construída quando a primeira camada aplicada atingir um certo grau de trincamento.

II.6.2 - Desenvolvimento do Modelo

Quando o pavimento se encontra pouco trincado, a influência das trincas existentes na deflexão é pequena, uma vez que a camada de revestimento mantém quase toda sua integridade. Assim, nesta condição, a taxa de crescimento da deflexão do pavimento com a percentagem de área trincada é também pequena,

sendo nula para $TR=0\%$ e crescendo monotonicamente a partir daí, supondo que todos os demais parâmetros de estrutura se mantenham constantes. O efeito do trincamento é, portanto, o de acelerar o crescimento das deflexões, o que pode ser visto qualitativamente na Fig.II.14, extraída da Ref.(1), onde é mostrado o crescimento da deformação elástica num ensaio de fadiga por compressão diametral em concreto asfáltico. A partir de 60-70% da vida de fadiga, começam a surgir as primeiras fissuras. Com a abertura e propagação das mesmas, a taxa de crescimento da deformação elástica, inicialmente quase nula, teve um crescimento contínuo até a ruptura completa do corpo-de-prova.

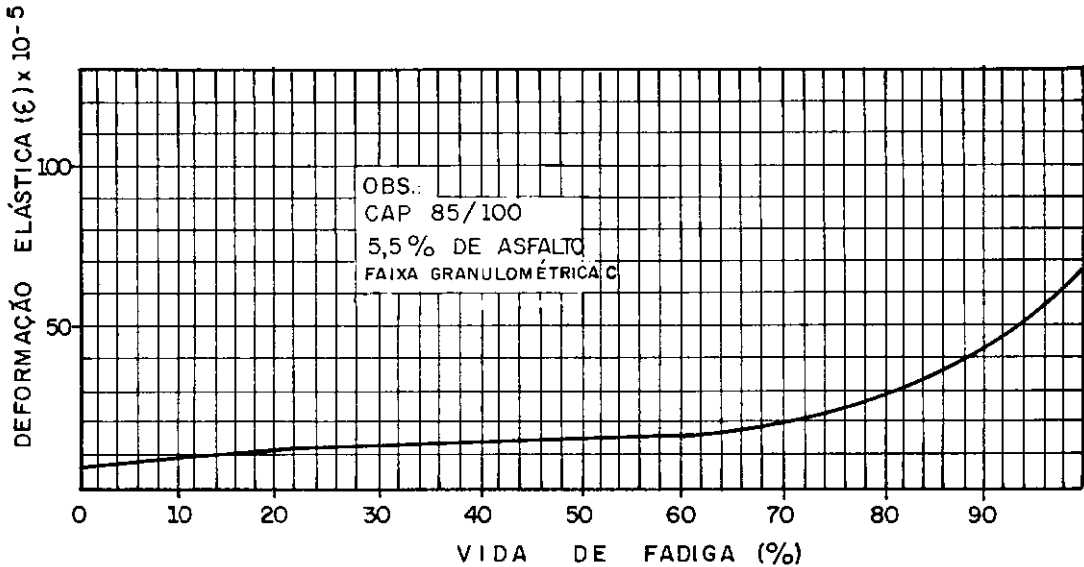


FIGURA II.14

As observações feitas valem se, durante o processo de trincamento, todos os demais parâmetros da estrutura do pavimento permanecerem inalterados. Quando se observa a evolução das deflexões com a percentagem de área trincada em pistas reais (Ref.24), vê-se que elas podem aumentar, diminuir ou simplesmente permanecer constantes ao longo do tempo. Isto se deve ao endurecimento do ligante betuminoso com a oxidação de campo, resultando em aumento do módulo da mistura íntegra (M_{Ro}) e, conseqüentemente, do módulo efetivo do revestimento trincado. Outra causa pode ser a melhor compactação das camadas granulares com a passagem dos veículos ao longo do tempo, levando ao aumento do módulo dessas camadas.

Um problema que tem analogia direta com o que é aqui

tratado e para o qual existe solução matemática rigorosa é o de uma viga sobre elástica, carregada por tensão normal uniforme, e com uma trinca que se desenvolve desde sua base até o topo (Ref.25). A Fig.II.15 mostra o crescimento do deslocamento vertical no centro dessa viga em função da profundidade relativa da trinca ao longo da altura da viga, para um certo carregamento e propriedades elásticas do sistema. A partir dessa figura e por derivação gráfica, obtém-se a Fig.II.16, onde se vê a variação da derivada primeira do deslocamento com a profundidade relativa da trinca. Derivando-se novamente, chega-se à derivada segunda, a qual pôde ser expressa pela relação:

$$\frac{d^2v}{d\zeta^2} = 126 (e^{0,01} - 1)$$

Esta última equação, se integrada duas vezes, fornece novamente a relação $v \times \zeta$. Para comparação, a Fig.II.17 mostra a curva $v \times \zeta$ correta juntamente com aquela obtida pela integração dupla da equação acima. Verifica-se uma concordância excelente entre ambas, mostrando que é possível considerá-la como a equação diferencial do problema da Fig.II.15.

Em síntese, as seguintes informações podem ser extraídas do problema analisado:

- (i) $\frac{dv}{d\zeta} = \frac{d^2v}{d\zeta^2} = 0$ para $\zeta = 0$;
- (ii) $\frac{dv}{d\zeta}$ e $\frac{d^2v}{d\zeta^2}$ são funções monótonas crescentes com ζ ;
- (iii) $\frac{d^3v}{d\zeta^3} \neq 0$ para $\zeta = 0$ e a derivada segunda pode ser aproximada pela função: $\frac{d^2v}{d\zeta^2} = 126 (e^{0,01} - 1)$

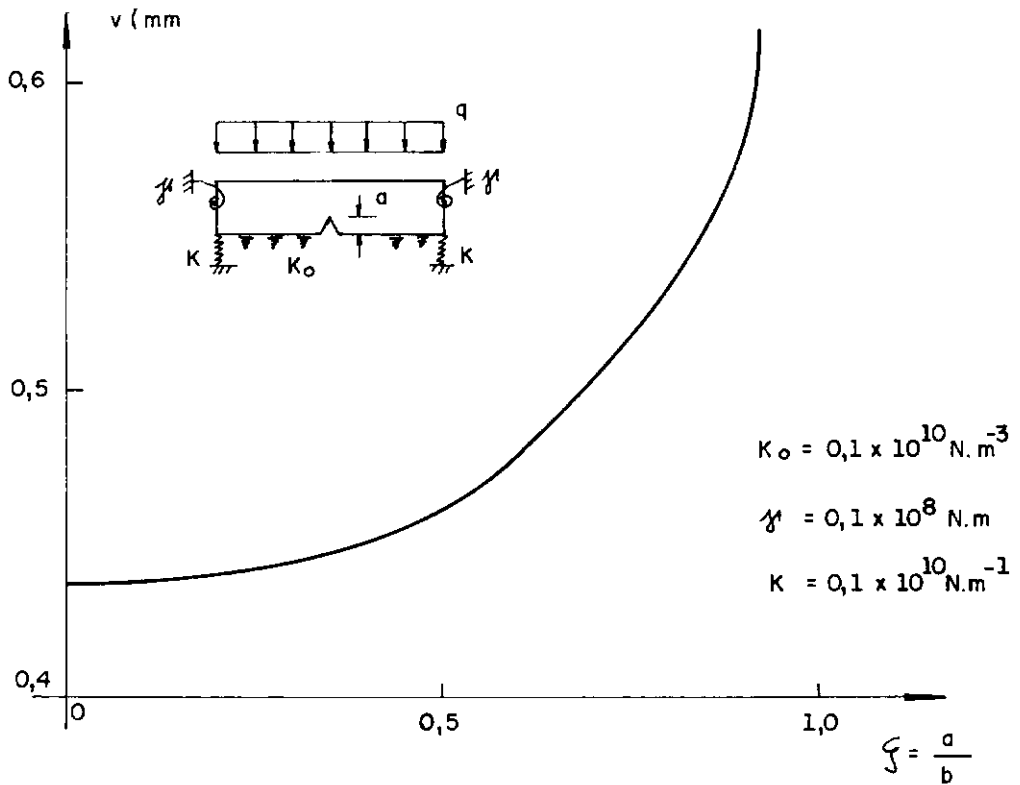


FIGURA II. 15

O deslocamento vertical v no centro da viga é análogo à deflexão D no centro da área circular carregada no pavimento, enquanto a profundidade relativa da trinca é análoga à percentagem de área trincada TR da camada de revestimento. Dessa forma, tendo em vista o que foi até agora discutido, serão admitidas as seguintes hipóteses para a dedução do modelo para a redução do módulo efetivo do revestimento com a percentagem de área trincada:

- (1) $M_{\text{Ref}} = M_{\text{Ro}}$ para $TR = 0\%$;
- (2) $M_{\text{Ref}} = \frac{1}{100} M_{\text{Ro}}$ para $TR = 100\%$;
- (3) $\frac{dD}{dTR} = \frac{d^2D}{dTR^2} = 0$ para $TR = 0\%$;

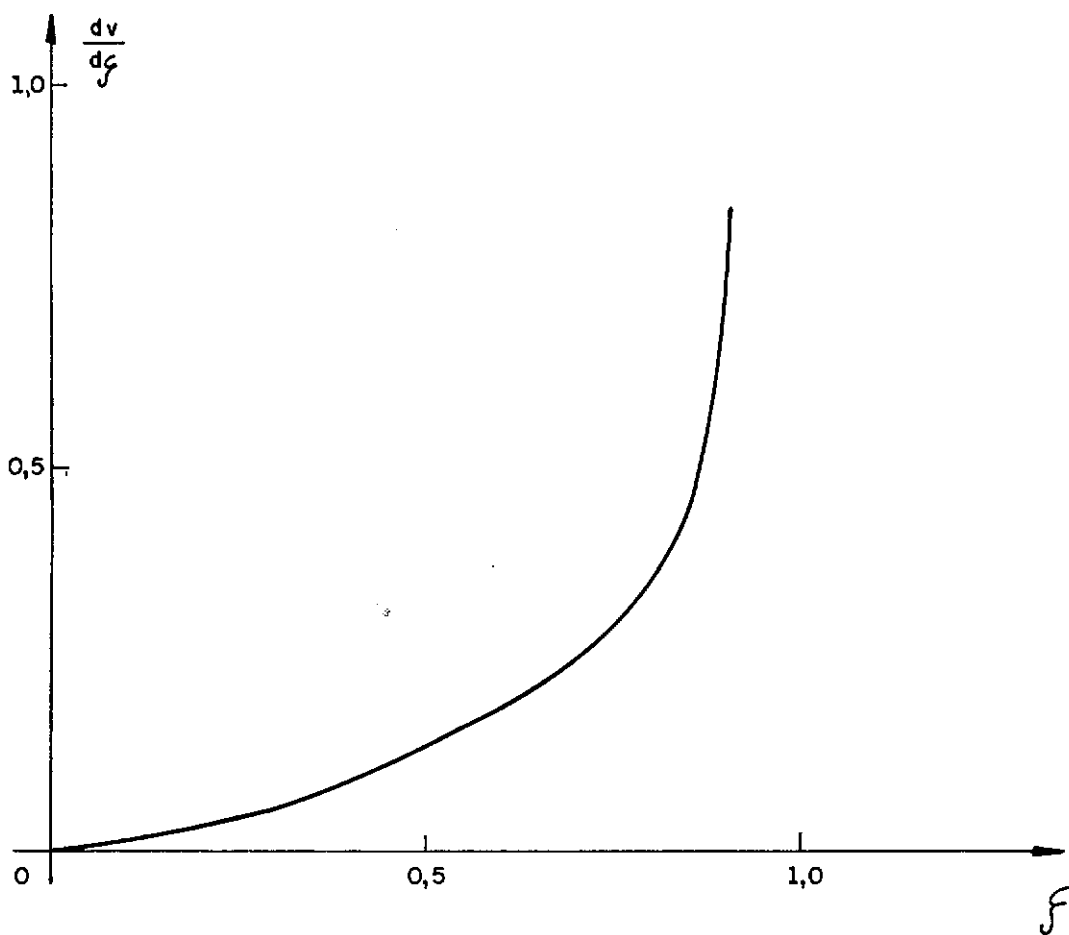


FIGURA II.16

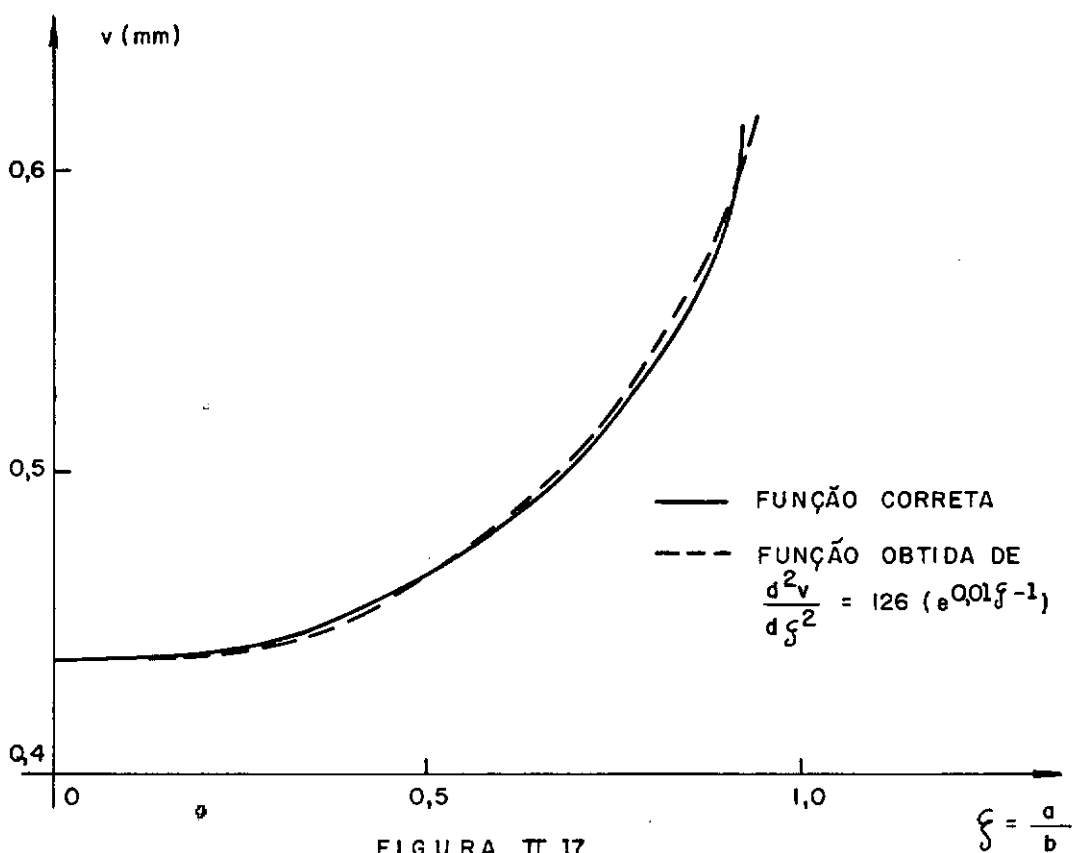


FIGURA II.17

(4) $\frac{dD}{dTR}$ e $\frac{d^2D}{dTR^2}$ são funções monótonas crescentes com TR;

(5) A função $\frac{d^2D}{dTR^2} = f(TR)$ pode ser escrita na forma: $\frac{d^2D}{dTR^2} = C_1 (e^{C_2 TR} - 1)$.

A Fig.II.18 resume as hipóteses acima. Nesta figura também se indica porque o modelo a ser desenvolvido é conservativo: as deflexões calculadas serão sempre superiores às do modelo real, o que se prova a partir das hipóteses (2), (3) e (4).

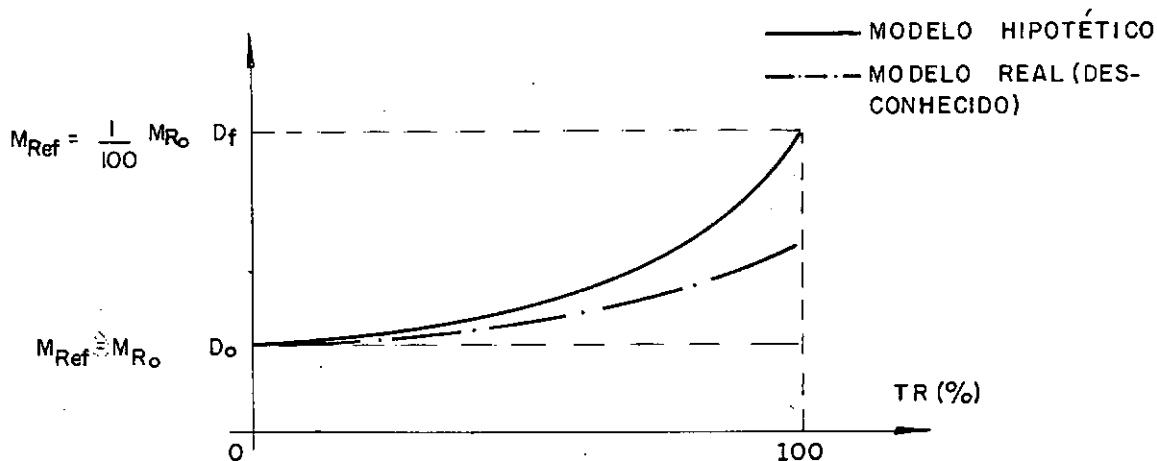


FIGURA II. 18

De acordo com a hipótese (5), pode-se escrever:

$$\frac{d^2D}{dTR^2} = A \frac{B}{100} (e^{\frac{B}{100} TR} - 1) \quad (II-35)$$

onde A e B devem ser constantes positivas (hipótese 4). Deve-se observar que escrevemos esta equação por analogia à forma da função que se observou aproximar-se daquela correspondente ao problema da viga trincada sobre base elástica (Fig.II.17). Assim, nenhuma consideração física direta do fenômeno em questão foi feita ao se escrever a eq.(II-35). O modelo final a ser obtido deve ser visto, portanto, como provisório e aceitável a nível de projeto apenas na medida em que é um limitante inferior para o módulo efetivo do revestimento trincado.

Integrando a eq. (II-35):

$$\left(\frac{dD}{dTR} \right) - \left(\frac{dD}{dTR} \right)_{TR=0} = A \frac{B}{100} \left[\frac{100}{B} \left(e^{B \frac{TR}{100}} - 1 \right) - TR \right] \quad (II-36)$$

Como $dD/dTR = 0$ para $TR = 0$, integrando novamente:

$$D - D_0 = A \frac{B}{100} \left\{ \frac{100}{B} \left[\frac{100}{B} \left(e^{B \frac{TR}{100}} - 1 \right) - TR \right] - \frac{TR^2}{2} \right\}$$

ou

$$D - D_0 = 100 \frac{A}{B} e^{B \frac{TR}{100}} - A \cdot TR - \frac{AB}{200} \cdot TR^2 - 100 \frac{A}{B} \quad (II-37)$$

Como D é função de TR e D_0 é uma constante, a igualdade na eq. (II-37) será satisfeita para todo TR se e somente se:

$$D = f(TR) = 100 \frac{A}{B} e^{B \frac{TR}{100}} - A \cdot TR - \frac{AB}{200} \cdot TR^2 \quad (II-38)$$

$$D_0 = 100 \frac{A}{B} \quad (II-39)$$

Combinando as eqs. (II-38) e (II-39), chega-se à relação entre a deflexão (D) e a percentagem de área trincada (TR):

$$D = D_0 \left[e^{B \frac{TR}{100}} - B \frac{TR}{100} - \frac{1}{2} \left(B \frac{TR}{100} \right)^2 \right] \quad (II-41)$$

A última condição a ser imposta é que $D = D_f$ para $TR = 100$ na eq. (II-41):

$$D_f = D_0 \left[e^B - B - \frac{1}{2} B^2 \right] \quad (II-42)$$

Finalmente, para que se obtenha a relação entre TR e M_{Ref} , é necessária uma relação entre M_{Ref} e D . Esta última pode ser a eq. (II-1):

$$D = \alpha M_{Ref}^{-0,4414} \quad (II-43)$$

onde α depende dos demais parâmetros da estrutura (H_R , H_B , M_{SL} , K_1 , K_2) e da carga aplicada (Q). Aplicando a eq. (II-43) às hipóteses (1) e (2):

$$TR = 0 \rightarrow D_O = \alpha M_{Ro}^{-0,4414}$$

$$TR = 100 \rightarrow D_f = \alpha \left(\frac{1}{100} M_{Ro} \right)^{-0,4414}$$

Dividindo uma pela outra e substituindo a relação obtida na eq. (II-42):

$$\frac{D_f}{D_O} = \left(\frac{1}{100} \right)^{-0,4414} = e^B - B - \frac{1}{2} B^2 \quad (II-44)$$

o que fornece o valor de B , igual a 2,61517.

Substituindo a eq. (II-43) na eq. (II-41) chega-se à relação procurada entre a percentagem de área trincada e o módulo efetivo da camada asfáltica trincada:

$$\left(\frac{M_{Ref}}{M_{Ro}} \right)^{-0,4414} = e^{2,61517 \left(\frac{TR}{100} \right)} - 2,61517 \left(\frac{TR}{100} \right) - 3,4196 \left(\frac{TR}{100} \right)^2 \quad (II-45)$$

A eq. (II-45) aparece na Fig. II.20. Como exemplo de aplicação do modelo obtido, seja um pavimento com revestimento em concreto asfáltico cujo módulo resiliente inicial, quando da construção, era de 3.000 MPa. Em um determinado momento da sua vida de serviço, quando a mistura já oxidada apresentar um módulo da ordem de 7.000 MPa e uma percentagem de área trincada de 50%, o módulo efetivo da camada será igual a:

$$M_{Ref}(TR=50\%) = 0,379 \cdot M_{Ro} = 0,379 \times 7.000$$

$$\Rightarrow M_{Ref} = 2.650 \text{ MPa}$$

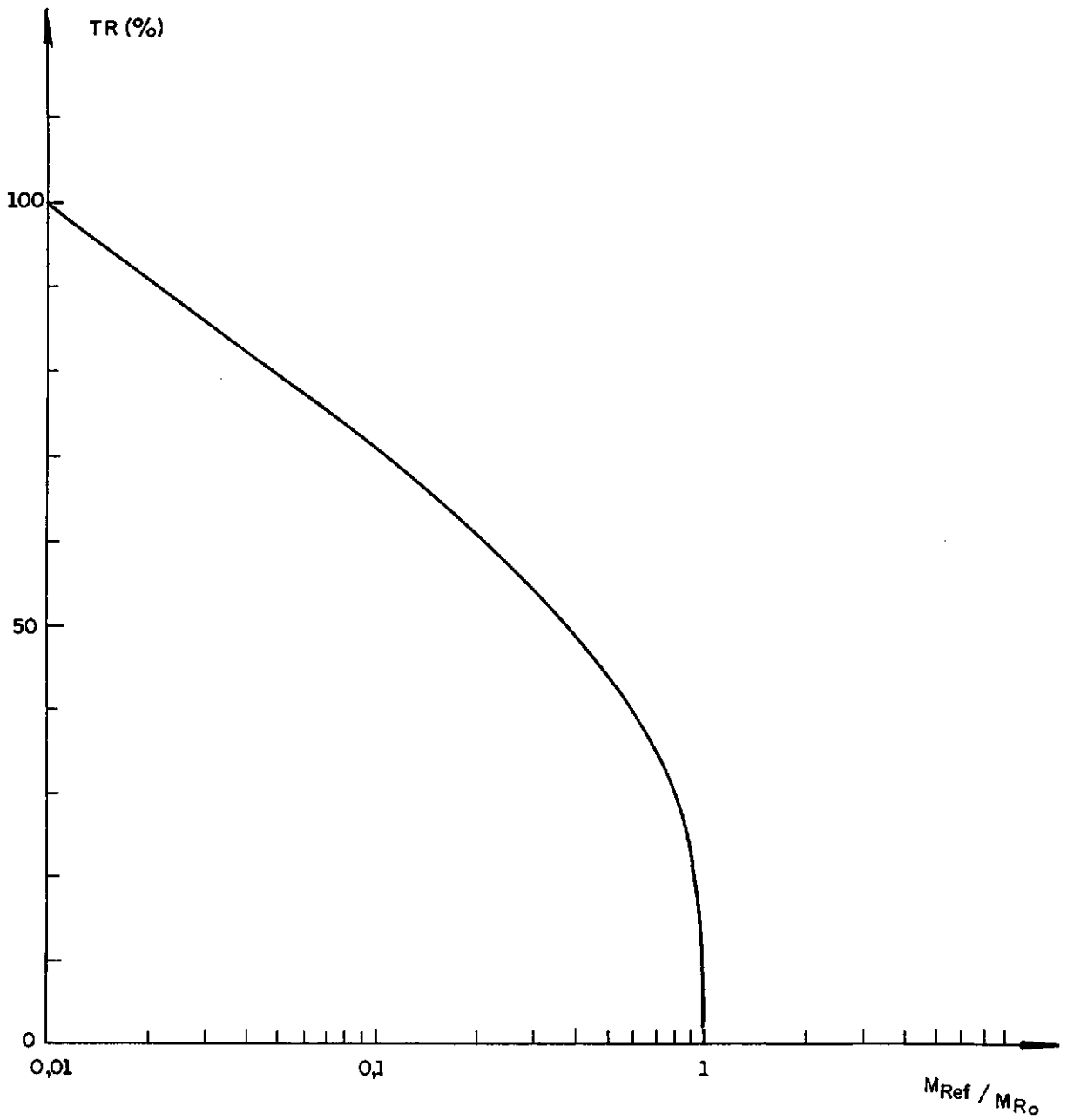


FIGURA II. 20

O modelo da eq.(II-45), apesar de subestimar o módulo efetivo do revestimento trincado, é menos conservativo que o critério adotado, por exemplo, pelo "Federal Highway Administration RII Procedure" (Ref.26), no qual se considera o módulo efetivo ' do concreto asfáltico como igual a 70.000 psi (500 MPa), se houver trincas classe 2 ou 3, independentemente da percentagem de área trincada.

CAPÍTULO III

ESTRUTURA DO PROGRAMA

O esquema de funcionamento do programa TECNAPAY original foi mantido (Ref.27). Foram substituídas as subrotinas para o cálculo da espessura efetiva do revestimento existente e para o cálculo da deflexão prevista na superfície da camada de reforço. A entrada de dados foi ampliada para permitir que se entre com as características de todas as camadas e com o espectro de cargas do tráfego. Além disso, incluíram-se três procedimentos alternativos para o cálculo das deflexões, sendo sua escolha função das condições de cada projeto particular.

III.1 - Dados de entrada

a) Características do pavimento original

O programa admite como dado de entrada um perfil de n camadas, sendo cada uma dessas camadas definida de acordo com parâmetros de resiliência dados por um dos seguintes modelos:

$$1 - \text{Linear} \longrightarrow M_R = \text{constante}$$

$$2 - \text{Granular} \longrightarrow M_R = K_1 \sigma_3^{K_2}$$

$$3 - \text{Bi-linear} \longrightarrow M_R = f(\sigma_d)$$

onde $f(\sigma_d) = K_2 + K_3 (K_1 - \sigma_d)$, se $\sigma_d < K_1$

$$K_2 + K_4 (\sigma_d - K_1), \text{ se } \sigma_d > K_1.$$

Em função do grau de confiança que se tem nos valores dos parâmetros de resiliência atribuídos aos materiais das várias camadas, deve-se selecionar o procedimento de cálculo das deflexões que o programa utilizará. Estes procedimentos foram designados como "Níveis A, B e C" e serão explicados no Capítulo

v.

Deve-se entrar ainda com as espessuras das camadas e com os pesos específicos dos materiais, a fim de que o estado de tensões inicial devido ao peso próprio possa ser avaliado.

A deflexão de projeto, medida com a viga Benkelman em prova-de-carga com o eixo de 80 kN, é dada como a deflexão característica do trecho mais um desvio-padrão. Utiliza-se o mesmo procedimento no cálculo da percentagem de área trincada de projeto do revestimento antigo.

b) Tráfego

Na versão aeroportuária, entra-se com as características de cada aeronave do tráfego:

- (i) Peso bruto;
- (ii) Pressão de inflação dos pneus;
- (iii) Relação passagem/cobertura;
- (iv) Número anual de operações;
- (v) Configuração do trem-de-pouso principal (número de rodas que influenciam a bacia de deformação crítica e suas distâncias à "roda de referência", definida como aquela que se encontra mais próxima ao ponto onde se dará a deflexão máxima dessa bacia de deformação).

Na versão rodoviária, pode-se entrar com o número equivalente de passagens do eixo-padrão de 80 kN ou, então, como no caso aeroportuário, com as características e número de passagens de cada carga de eixo do tráfego.

c) Condições Técnicas

Deve-se fornecer o período de análise para o qual se projetou o tráfego e que será o período a ser coberto pelas estratégias de reforço. Cada solução de reforço deverá durar um número mínimo de anos, fornecido também como dado.

Para cada estratégia de reforço, o programa calcula o custo total (valor presente da construção futura), devendo-se fornecer:

- (i) Taxa de oportunidade do capital;
- (ii) Custo por metro cúbico do CBUQ;
- (iii) Custo por metro quadrado da lama asfáltica.

III.2 - Método de Solução

O programa calcula a espessura efetiva do revestimento existente a partir da deflexão de projeto. A seguir, para cada carga do tráfego, calcula a deflexão prevista na superfície de cada camada de reforço aplicada. Esta deflexão, substituída no critério de fadiga, equações (I-4) e (I-5), leva ao número de repetições de carga que conduz o pavimento à ruptura por fadiga. Pela aplicação da Lei de Miner:

$$\sum_i \frac{N_i}{N_{Ti}} \leq 1 \quad (\text{III-1})$$

determina-se se o reforço aplicado satisfaz ou não à vida útil mínima. Quando for encontrada uma solução que a satisfaça, uma nova solução de reforço é procurada até que o período de análise seja coberto. Finalmente, o programa imprime as cinco estratégias de menor custo total.

A equação (III-1) é utilizada no caso aeroportuário. Para o caso rodoviário, a vida de serviço da camada de reforço será aquela em que o pavimento atingir pelo menos 50% de área trincada, calculada de forma incremental pelo modelo (I-6), sendo que a eq. (III-1) deverá ser verificada para a vida útil mínima (Ref.2).

Um dado de entrada adicional é o número de camadas asfálticas e cimentadas (NC). Estas camadas serão transformadas numa única, de espessura igual à soma de suas espessuras e módulo equivalente calculado pela aplicação sucessiva da eq. (II-8). A camada seguinte (ou seja, camada NC+1) é, por definição, a camada de base, a qual será mantida como está. A única restrição

quanto aos dados de entrada do programa é que esta camada deve ter parâmetros de resiliência dados pelos modelos granular ou linear, não podendo ser bi-linear.

As camadas abaixo da camada de base (NC+1) serão transformadas numa camada semi-infinita, cujo módulo equivalente será calculado pela aplicação sucessiva (de baixo para cima) do procedimento apresentado na Parte II.2.2. Antes dessa transformação ser efetuada, contudo, é necessário o cálculo do módulo de cada camada, se este não for conhecido, a partir do modelo de resiliência fornecido como dado de entrada para aquela camada.

O módulo de uma camada qualquer situada abaixo da base será calculado pela aplicação de uma das equações (II-18), (II-19), (II-21) ou (II-22), as quais fornecem a tensão produzida no topo do subleito em um pavimento de três camadas devido à carga aplicada, sem levar em conta o peso próprio das camadas situadas acima do subleito. Para isso, as seguintes considerações foram feitas:

- (i) A camada cujo módulo vai ser calculado é considerada semi-infinita, qualquer que seja sua espessura;
- (ii) A espessura da camada de base inclui as camadas situadas entre ela e a camada cujo módulo vai ser calculado, ou seja, a base é considerada como se estendendo até o topo dessa camada.

A consideração (i) pode levar a erros consideráveis no cálculo do módulo de camadas pouco espessas (menos de 10cm). Estas espessuras, contudo, não são usuais em camadas de sub-base ou de reforço do subleito. Já a consideração (ii) é plenamente justificável, tendo em vista que as tensões σ_3 ou σ_d no topo do subleito são pouco influenciadas pelo módulo da base, dependendo fundamentalmente de sua espessura (vide eqs. (II-18) a (II-22)).

Se a camada cujo módulo vai ser calculado for granu-

lar, com modelo $M_R = K_1' \sigma_3^{K_2'}$, a tensão confinante σ_3 será a soma de duas parcelas:

$$\sigma_{3pp} = K_0 \sum_i \gamma_i h_i = \text{peso próprio das camadas superpostas}$$

$$\sigma_{3c} = \text{confinamento devido à carga aplicada}$$

$$\sigma_3 = \sigma_{3pp} + \sigma_{3c} \quad (\text{III-2})$$

A parcela σ_{3c} será calculada por uma das equações referidas ((II-18) ou (II-21), dependendo se a base é de modelo granular ou linear). Substituindo, por exemplo, a eq. (II-18), o módulo M_R da camada será calculado pela solução equação:

$$M_R = K_1' (K_0 \sum_i \gamma_i h_i + \alpha M_R^{0,4575} \cdot Q^{0,7935})^{K_2'} \quad (\text{III-3})$$

Nesta equação, todos os termos são conhecidos, exceto a incógnita M_R . A carga Q é aquela que produz a tensão σ_{3c} . Assim, no caso de eixos de rodas múltiplas, ela deverá ser a carga de roda simples equivalente calculada em termos da tensão vertical no subleito, dada pelas eq. (II-30) e (II-31). Contudo, como para o cálculo do fator α é necessário o conhecimento do módulo do subleito (M_{SL}), que é a incógnita M_R da eq. (III-3), deve haver uma iteratividade de cálculo entre essas equações. Assim, M_R será avaliado, numa primeira etapa, fazendo Q igual à carga de roda da configuração pela eq. (III-3). Em seguida, com o M_R obtido, calcula-se a ESWL pelas eqs. (II-30) e (II-31), a qual é, então, substituída na eq. (III-3) ($Q \leftarrow \bar{Q}$), reavaliando-se o módulo M_R , até que haja convergência dos módulos obtidos.

Na eq. (III-3), o coeficiente de empuxo de terras no repouso (K_0) é admitido como igual a um para os solos compactados em pavimentação.

Por outro lado, se o módulo da camada for dependente da tensão desvio, de acordo com o modelo bi-linear, será aplicada uma das equações (II-19) ou (II-22), dependendo do modelo de resiliência da base. Estas equações dão a tensão desvio ($\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$) no topo do subleito devido à carga aplicada. Como

se admite $K_0 = 1$, não há uma parcela devido ao peso próprio. Assim, supondo, por exemplo, que a base é granular, o módulo da camada será dado pela solução iterativa de uma das eqs.(III-4):

$$M_R = K_2 + K_3 \left[K_1 - \beta M_R^{0,279} \cdot Q^{1,053} \right], \text{ se } \sigma_d < K_1$$

$$M_R = K_2 + K_4 \left[\beta M_R^{0,279} \cdot Q^{1,053} - K_1 \right], \text{ se } \sigma_d > K_1$$

(III-4)

Novamente, a carga Q é a ESWL em termos da tensão vertical no topo de subleito e a solução de (III-4) deve ser iterativa. A constante β é conhecida e depende dos demais parâmetros da estrutura.

Todas as etapas até aqui enumeradas são executadas por uma única subrotina, para cada carga do tráfego e cada vez que se aumenta a espessura da camada de reforço aplicada de um centímetro. O resultado dessa subrotina é um perfil de três camadas, para o qual se calcula a deflexão pela eq.(II-7), se o módulo equivalente da base for maior que o do subleito. Se isto não ocorrer, utiliza-se a eq.(II-1) ou (II-2), se a estrutura obtida se enquadrar na faixa de validade dessas equações (Quadro II.1). Caso contrário, a camada de base e o subleito serão transformados num semi-espaco homogêneo, com módulo equivalente dado pelo procedimento apresentado na Parte II.2.2 e a deflexão será calculada pelas soluções para sistema de duas camadas, eq. (II-3) ou (II-6). Antes que a deflexão possa ser calculada, contudo, é necessário o cálculo da ESWL em termos da deflexão sob uma das rodas da configuração múltipla, pelas eqs.(II-27) e (II-28).

Se a primeira solução de reforço obtida (ou seja, que verifica a vida útil mínima) não cobrir o período de análise, uma segunda solução será procurada, sendo esta aplicada no fim da vida de serviço da primeira solução. É necessário, portanto, que se conheça a condição estrutural das camadas de revestimento naquele momento futuro, a fim de se estimar a deflexão prevista na superfície do segundo reforço aplicado. Para isso, admite-se que, por ocasião do fim da vida de serviço do primeiro reforço, seu módulo efetivo seja dado como aquele correspondente

a 50% de área trincada, através do modelo desenvolvido no item II.6.2, o qual, como já discutido, subestima esse módulo:

$$M_{\text{Ref}}(\text{TR} = 50\%) = 0,38 M_{\text{Ro}} \quad (\text{III-5})$$

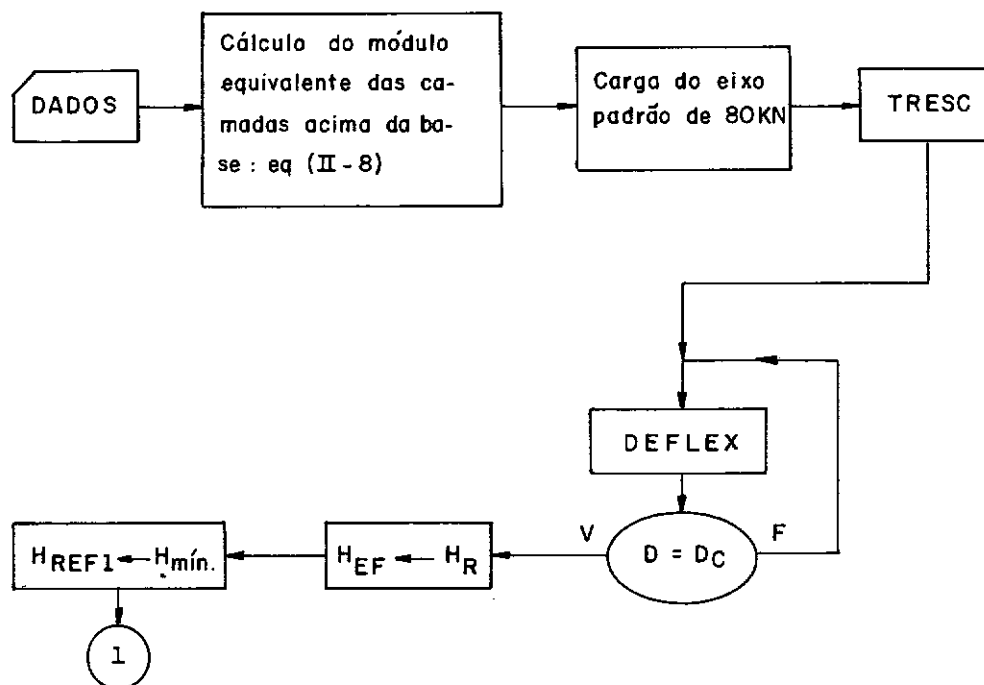
onde M_{Ro} é o módulo do revestimento íntegro. Quando da aplicação da eq. (III-5), admite-se que o módulo da camada de reforço (M_{Ro}) cresceu de 30.000 para 60.000 Kgf/cm² devido ao processo de endurecimento do ligante com a intemperização de campo.

Se o período de análise ainda não for coberto pela segunda solução encontrada, uma terceira e última solução será procurada, sendo esta aplicada no fim da vida de serviço da segunda solução e sobre as duas camadas de reforço já construídas. O procedimento para o cálculo do módulo efetivo do revestimento existente é o mesmo já descrito, pela eq. (III-5), sendo que M_{Ro} deve incluir agora a segunda camada de reforço através da eq. (II-8).

III.3 - Fluxograma Simplificado

O algoritmo do programa principal é o mesmo daquele apresentado na Ref.27. As adaptações feitas quanto à troca de algumas subrotinas aparecem na Fig.III.1 que é, em linhas gerais, o fluxograma referente ao programa desenvolvido, cuja listagem em BASIC constitui o Apêndice ... As figuras subsequentes explicam o funcionamento de cada uma das novas subrotinas, de acordo com o que foi exposto no item III.2.

CÁLCULO DA ESPESSURA EFETIVA DO REVESTIMENTO EXISTENTE



PRIMEIRA SOLUÇÃO DE REFORÇO

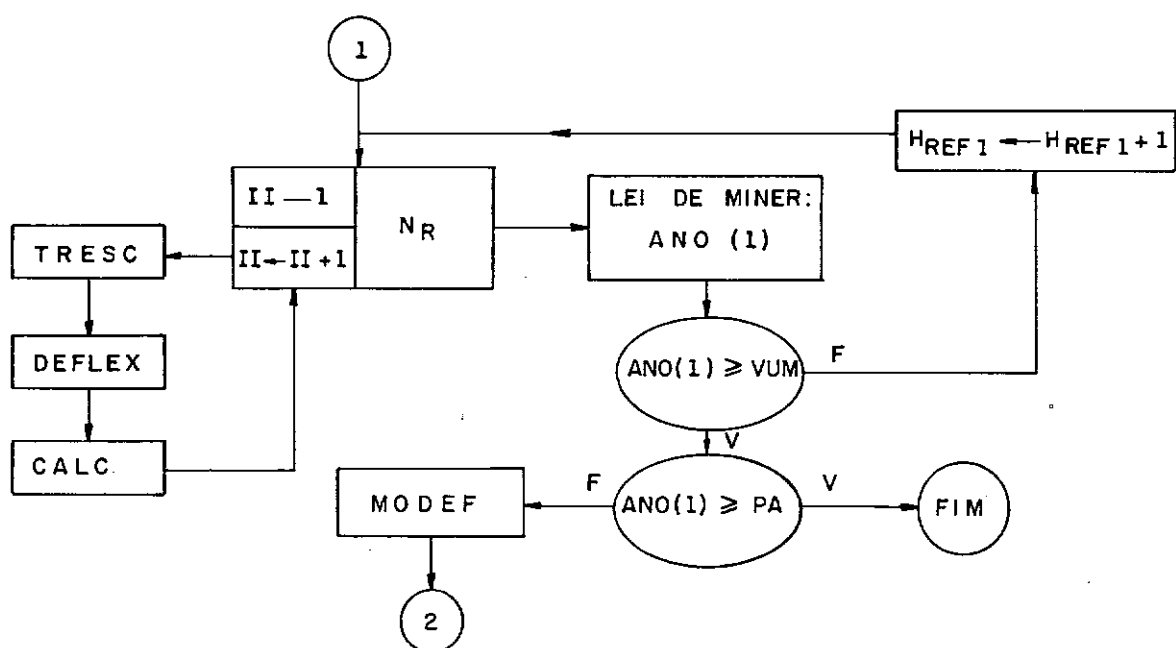
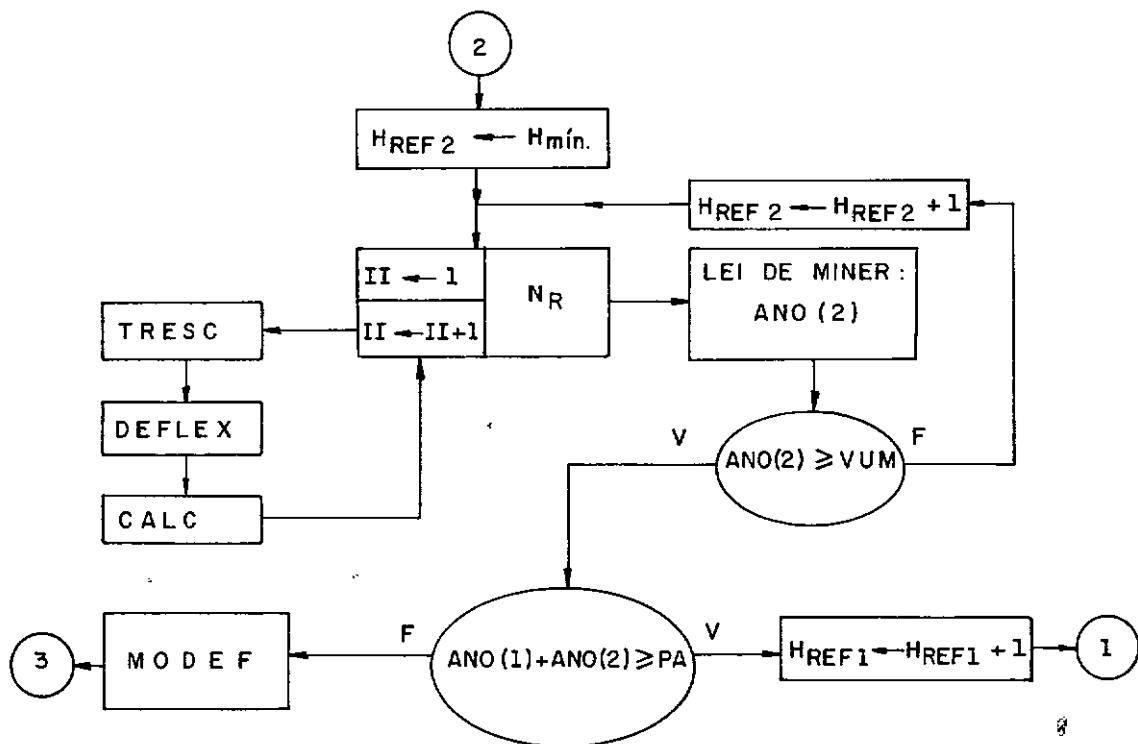


FIGURA III.1 - FLUXOGRAMA GERAL

SEGUNDA SOLUÇÃO DE REFORÇO



TERCEIRA SOLUÇÃO DE REFORÇO

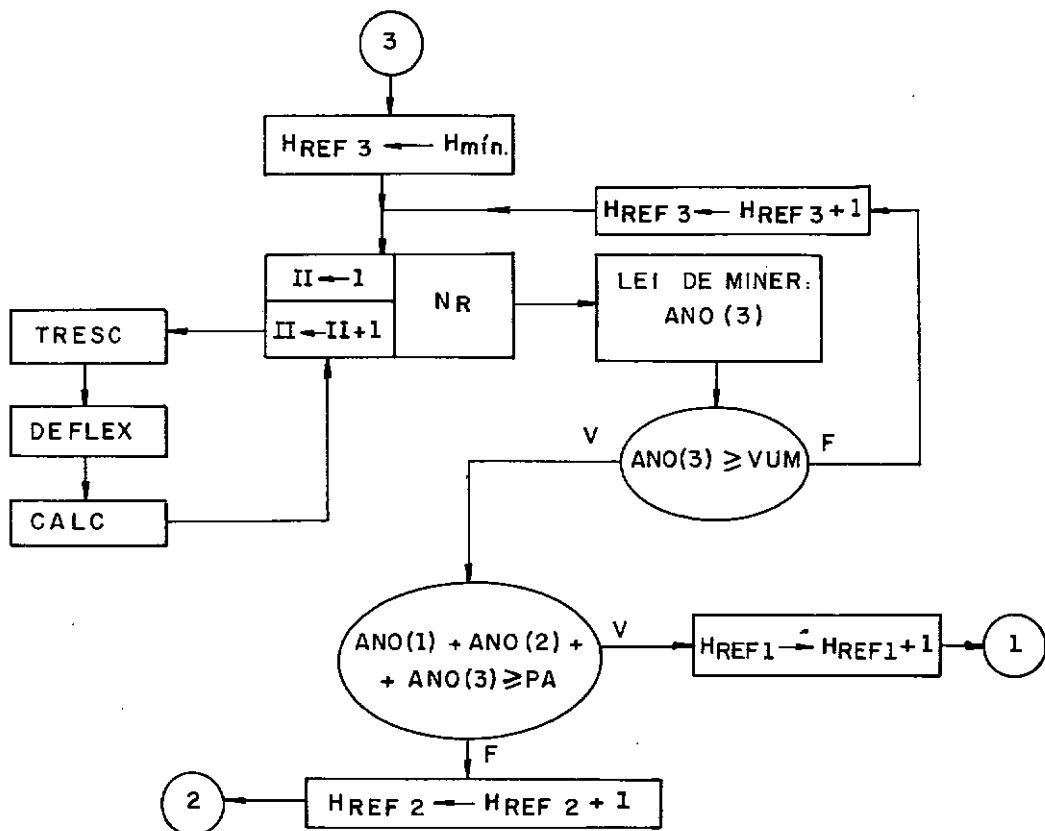


FIGURA III.1 (CONTINUAÇÃO)

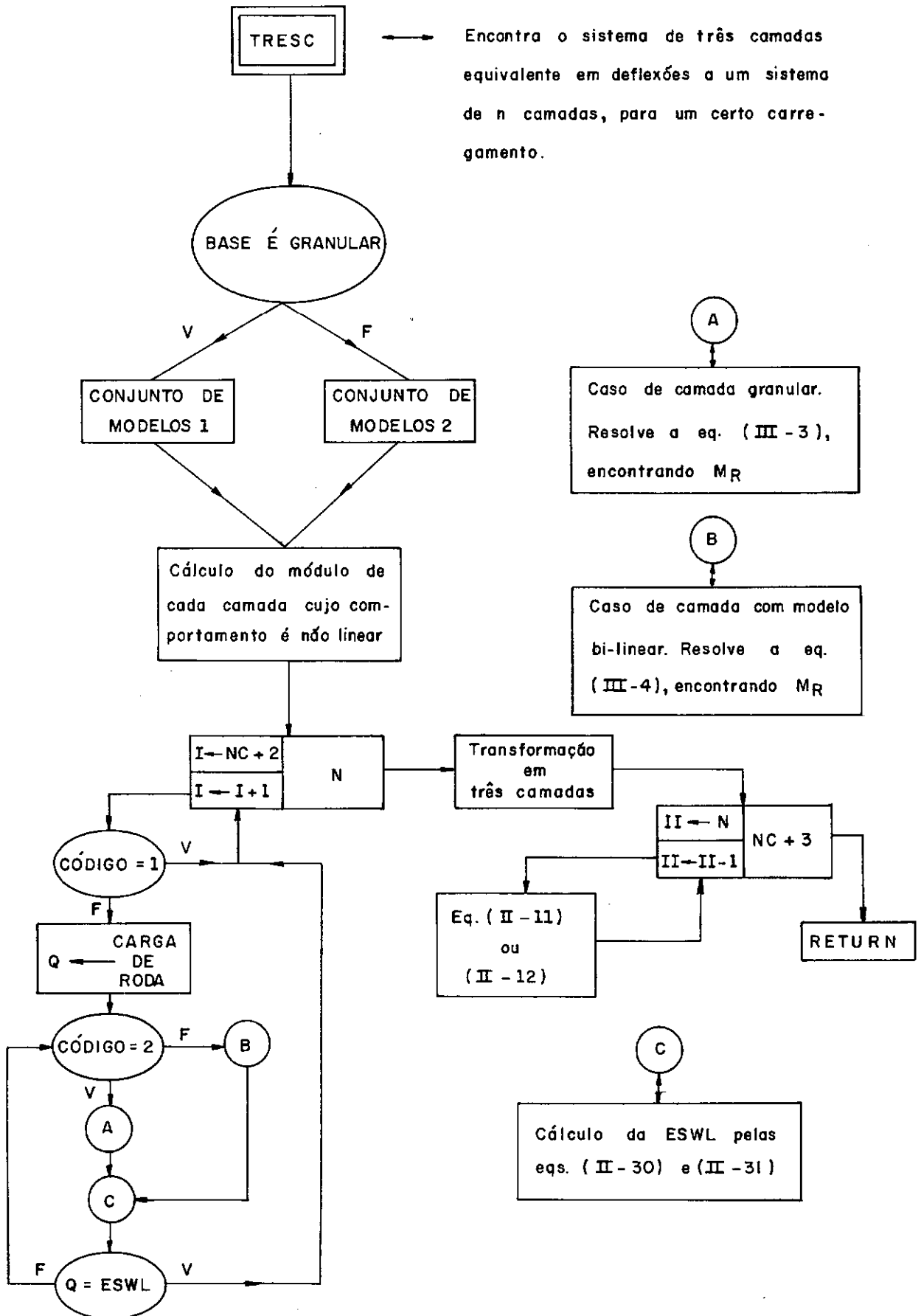


FIGURA III. 2 - SUBROTINA TRESA

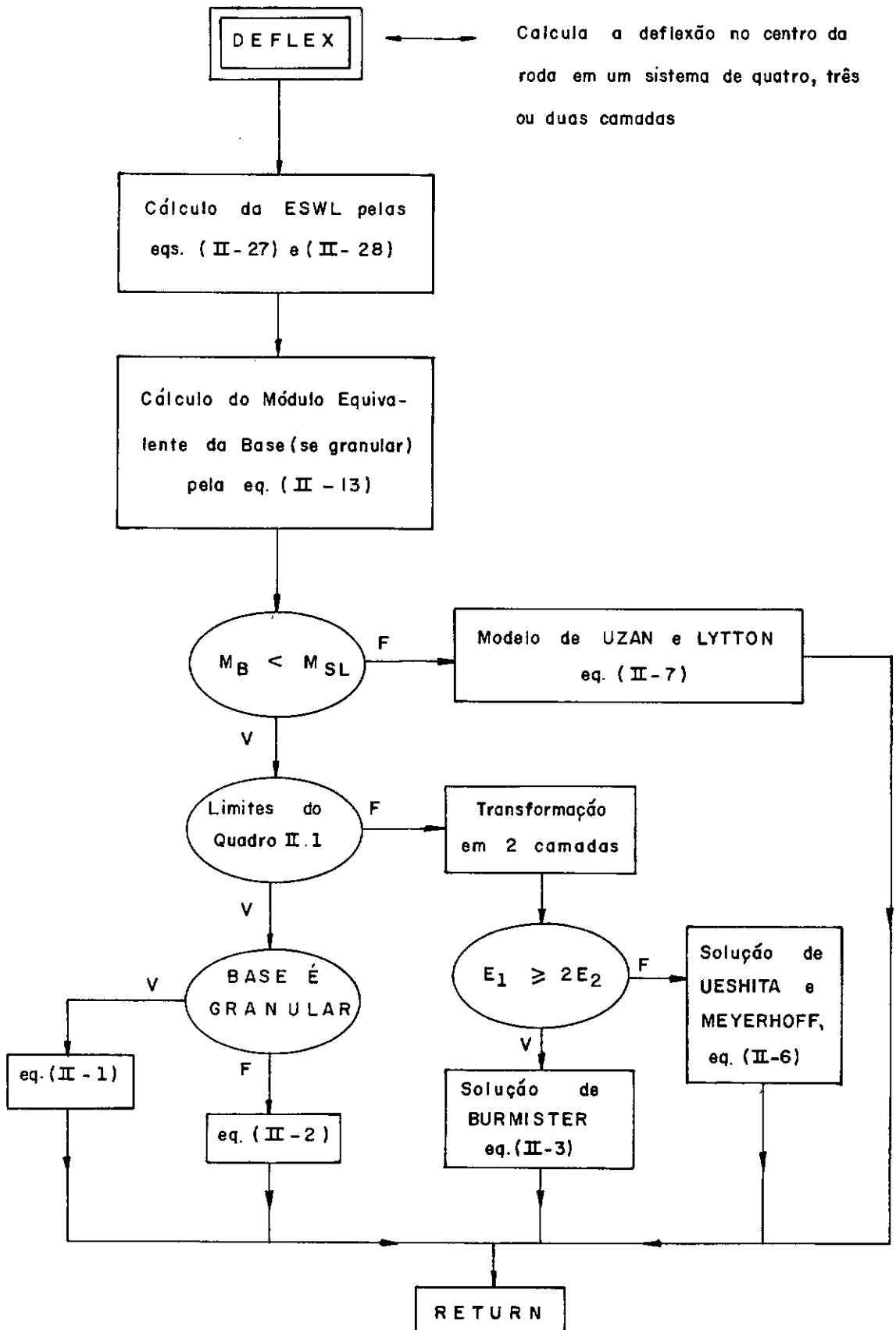
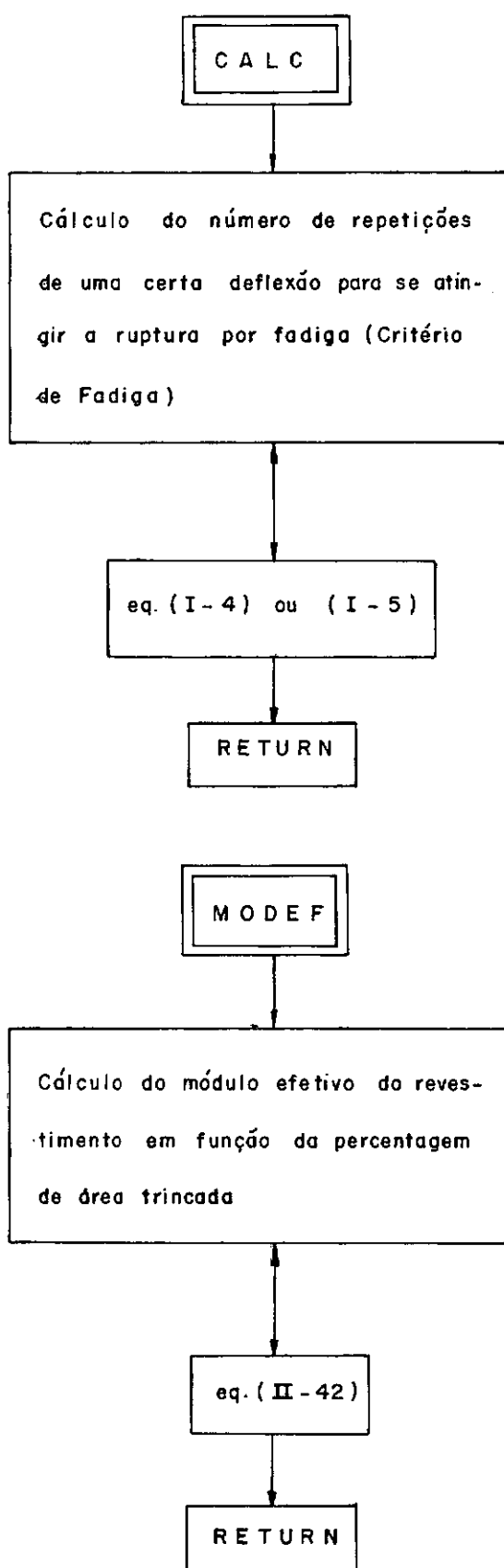


FIGURA III.3 - SUBROTINA DEFLEX



F I G U R A III. 4

CAPÍTULO IV

PREVISÃO DE DEFLEXÕES

O procedimento de cálculo apresentado no item III.2 visa a previsão das deflexões na superfície de camadas de reforço construídas sobre uma estrutura de pavimento cuja deflexão é conhecida. Qualquer método teoricamente correto que efetue o ajuste de algum parâmetro da estrutura do pavimento existente, de modo a que este reproduza a deflexão de campo, será capaz de prever, com maior ou menor acerto, a deflexão do pavimento após a aplicação de uma camada de reforço. Assim, até mesmo o procedimento mais simples, como aquele adotado pelo Método do Instituto do Asfalto no seu MS-17 (Ref.31), que encontra o módulo de uma camada homogênea semi-infinita (E_S) para a reprodução da deflexão de campo (D_C):

$$E_S = 1,5 \frac{pa}{D_C} \quad (IV-1)$$

(p = pressão de contato; a = 6,4 in)

e que determina a espessura de reforço (h_1) para que a deflexão caia até a deflexão de projeto (D_P), num sistema de duas camadas (Fórmula de KIRK):

$$D_P = \frac{1,5 pa}{E_S} \left(\left\{ 1 - \left[1 + 0,8 \left(\frac{h_1}{a} \right)^2 \right]^{-1/2} \right\} \frac{E_S}{E_1} + \left\{ 1 + \left[0,8 \frac{h_1}{a} \left(\frac{E_1}{E_S} \right)^{1/3} \right]^2 \right\}^{-1/2} \right) \quad (IV-2)$$

pode dar uma estimativa suficientemente exata da deflexão na superfície do reforço. Contudo, este método é aplicável apenas a rodovias, uma vez que não pode ser extrapolado para cargas mais elevadas que a do eixo padrão de 80 kN, já que não considera o efeito particular de cada uma na estrutura do pavimento (comportamento elástico não-linear).

Um método de previsão de deflexões, para que possa ser aplicável a quaisquer cargas, deve ser capaz de prever a deflexão de campo de um pavimento existente em função dos parâmetros associados à estrutura do pavimento que são requeridos por esse método, sendo estes parâmetros medidos, por algum procedimento, nos materiais que constituem as camadas do pavimento em questão. Assim, se o método puder prever a deflexão produzida pelo eixo de 80 kN, pode-se induzir que suas previsões para as deflexões de cargas mais elevadas serão corretas. No caso do Método da Resiliência, esta exigência significa que as deflexões de campo devem ser previstas quando se utilizar os parâmetros de resiliência dos materiais das camadas, medidos em laboratório através de ensaios de cargas repetidas, como dados de entrada do método.

Esta verificação foi feita para o método apresentado no item III.2, utilizando-se, para isso, de perfis onde foram medidas as deflexões em prova-de-carga com o eixo de 80 kN pela viga Benkelman e para os quais foram realizados ensaios de cargas repetidas para a determinação dos parâmetros de resiliência dos seus materiais constituintes. Os resultados obtidos aparecem no Quadro IV.1 e na Fig. IV.1, nos quais se observa uma boa concordância entre as deflexões medida e calculada, mostrando a razoabilidade daquele procedimento, para os fins práticos a que se destina.

A Fig. IV.1 constitui uma verificação da validade daquele procedimento que será denominado por "Nível A" no Capítulo V. O "Nível C", que consiste dos modelos do programa original, apresentados no item I.2, já foi verificado ser válido em muitos casos (Ref.34). Resta, assim, a verificação do terceiro procedimento ("Nível B"), o qual efetua o ajuste dos módulos da base e do subleito do pavimento de modo que a deflexão de campo seja reproduzida. Sua formulação consiste das seguintes etapas (ver Fig. IV.2):

- (i) Cálculo do módulo equivalente da base granular:

$$M_B = 0,12925 \cdot H_R^{0,2693} \cdot H_B^{-0,8207} \cdot M_{RV}^{0,3831} \cdot M_{SL}^{-0,3152} \cdot K_1^{0,9415} \cdot K_2^{-2,706}$$

QUADRO IV.1

SEÇÃO.	DEFLEXÃO CALCULADA (0,01mm)	DEFLEXÃO MEDIDA (0,01mm)	REFERÊNCIA
BR-040	62	64	PREUSSLER (1)
BR-290/RS	28	entre 22 e 30	"
BR-381/SP	71	85	"
BR-116/MG	40	52	"
BR-116/MG	8	entre 7,5 e 9,6	"
BR-101/SC (Seção. 11)	70	63	PINTO et alii(32)
BR-101/SC (Seção. 12)	34	45	"
Aeroporto Goia- beiras	22	14	Relatórios das Campanhas de Ava- liação da
Aeroporto Dois de Julho	20	20	DIRENG (MAer), 1985
Aeroporto Santa Maria	33	26	"

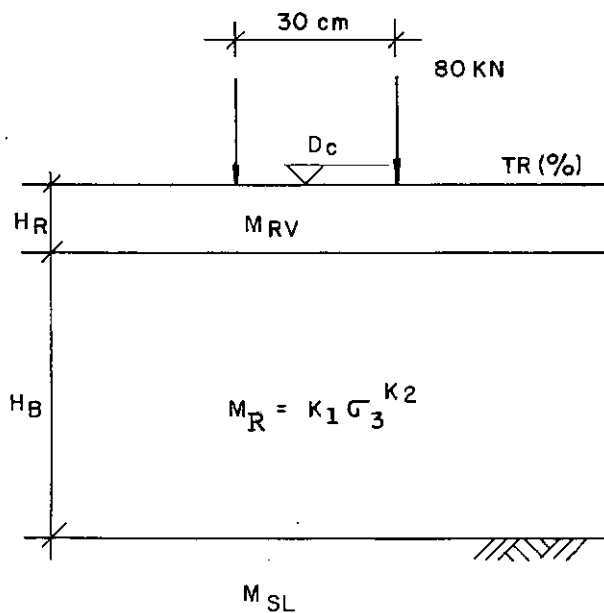


FIGURA IV.2

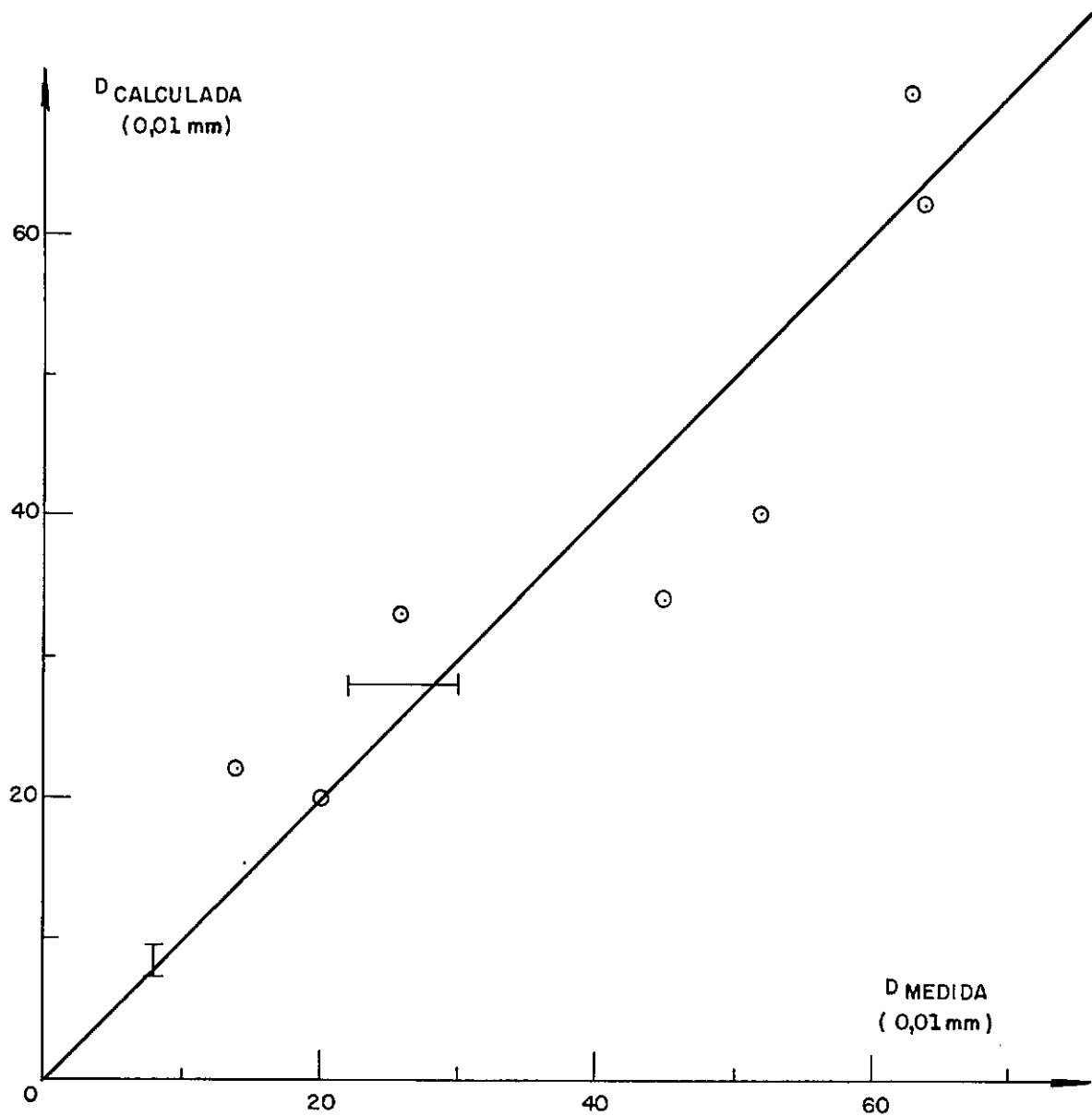


FIGURA IV.1

(IV-3)

com M_{RV} igual ao módulo efetivo correspondente à percentagem de área trincada de campo (TR), pela eq. (II-45).

(ii) Cálculo da razão entre o módulo da base e o módulo (arbitrado) do subleito:

$$K = \frac{M_B}{M_{SL}} \quad (IV-4)$$

(iii) Cálculo da CRSE de duas rodas separadas centro-a-centro em 15 cm:

$$\bar{Q} = 2,05 \left(1 + e^{-\frac{15}{10,8} \eta} \right) \quad (IV-5)$$

$$\eta = 5,5189 \cdot H_R^{-0,8058} \cdot M_{RV}^{-0,3593} \cdot M_B^{-0,07506} \cdot M_{SL}^{0,432}$$

(iv) Cálculo dos módulos da base e do subleito para que seja reproduzida a deflexão de campo:

$$D_C = 2 (\bar{D} - D)$$

onde \bar{D} é a deflexão produzida pela carga \bar{Q} e D é aquela produzida pela carga de roda ($Q = 2,05$ tf), dadas pela eq. (II-2). Assim:

$$M'_B = 1,6607 \times 10^8 \cdot D_C^{-1,4669} \cdot H_R^{-1,1487} \cdot H_B^{0,1017} \cdot M_{RV}^{-0,4184} \cdot K^{0,5937}.$$

$$(\bar{Q}^{0,9224} - Q^{0,9224})^{1,467} \quad (IV-6)$$

$$M'_{SL} = \frac{M'_B}{K} \quad (IV-7)$$

(v) Cálculo da deflexão na superfície da camada de reforço (Fig.IV.3):

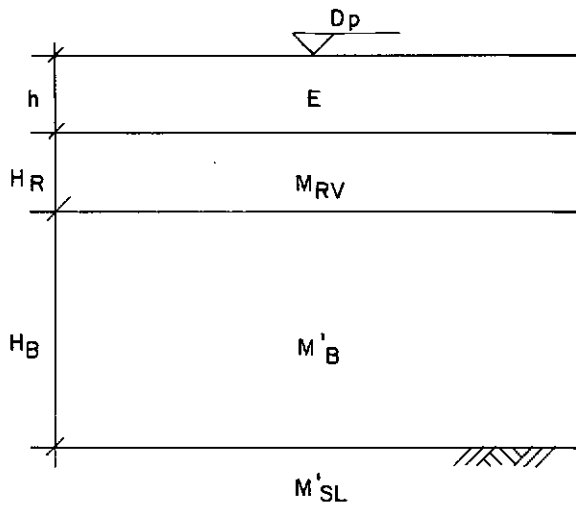


FIGURA IV.3

$$D_P = 4,0157 \times 10^5 \cdot (H_R + h)^{-0,7831} \cdot H_B^{0,06933} \cdot M^*{}^{-0,2852} \cdot M'_B{}^{-0,2770}$$

$$M'_{SL}{}^{-0,4047} \cdot (\bar{Q}^{0,9224} - Q^{0,9224}) \quad (IV-8)$$

$$M^* = \left[\frac{H_R \cdot M_{RV}^{1/3} + h \cdot E^{1/3}}{H_R + h} \right]^3$$

Este procedimento, aplicado a uma série de trechos experimentais (Ref.24), apresentou os resultados mostrados no Quadro IV.2 e na Fig.IV.4. As camadas granulares foram modeladas de acordo com: $M_R = 5495 \sigma_3^{0,88}$, enquanto o subleito foi classificado como do Tipo I, II ou III, para efeito do cálculo da razão K. Na Fig.IV.4, observa-se uma boa correlação entre as deflexões prevista e medida, mostrando que a formulação apresentada é capaz de prever as deflexões de pavimentos restaurados, ao menos para os perfis analisados.

Quadro IV.2 - ESTRUTURAS DOS PAVIMENTOS

TRECHO	PAVIMENTO ORIGINAL			CAMADA DE REFORÇO (cm)	DEFLEXÃO (0,01mm)		
	REVESTIMENTO (cm)	BASE E SUB-BASE GRANULAR (cm)	SUBLEITO (TIPO)		M E D I D A		PREVISTA
					ANTES DO REFORÇO	APÓS O REFORÇO	
T270, BR-393/RJ	CA-20	22	III	CA-4 e PMF-8	118	86	79
T271, BR-393/RJ	CA-20	22	III	CA-4 e PMF-4	100	70	87
T272, BR-393/RJ	CA-20	22	III	PMF-4	112	97	104
T273, BR-393/RJ	CA-20	22	III	CA-4	102	80	98
T274, BR-393/RJ	CA-20	22	III	CA-6	124	74	90
T275, BR-393/RJ	CA-20	22	III	CA-8	123	61	83
T276, BR-393/RJ	CA-20	22	III	CA-12	123	64	73
T277, BR-393/RJ	CA-20	22	III	CA-10 e PMF-15	118	69	58
T471, BR-116/MG	CA-8	33	II	PMQ-15	55	35	23
T473, BR-116/MG	CA-8	33	II	CA-5	70	61	46
T420, BR-116/MG	PMQ-9 e CA-6	34	II	CA-5	49	40	40
T450, BR-290/RS	PMF-15 e CA-6	41	III	CA-9	84	68	61
T455, BR-290/RS	CA-6	41	III	CA-12	83	60	41
T370, BR-262/MG	PMF-7 e TSD-2	52	II	CA-7	43	35	24
T421, BR-116/BA	CA-6	34	II	CA-5	59	50	40
T422, BR-116/BA	PMQ-7 e CA-6	34	II	CA-5	55	42	42

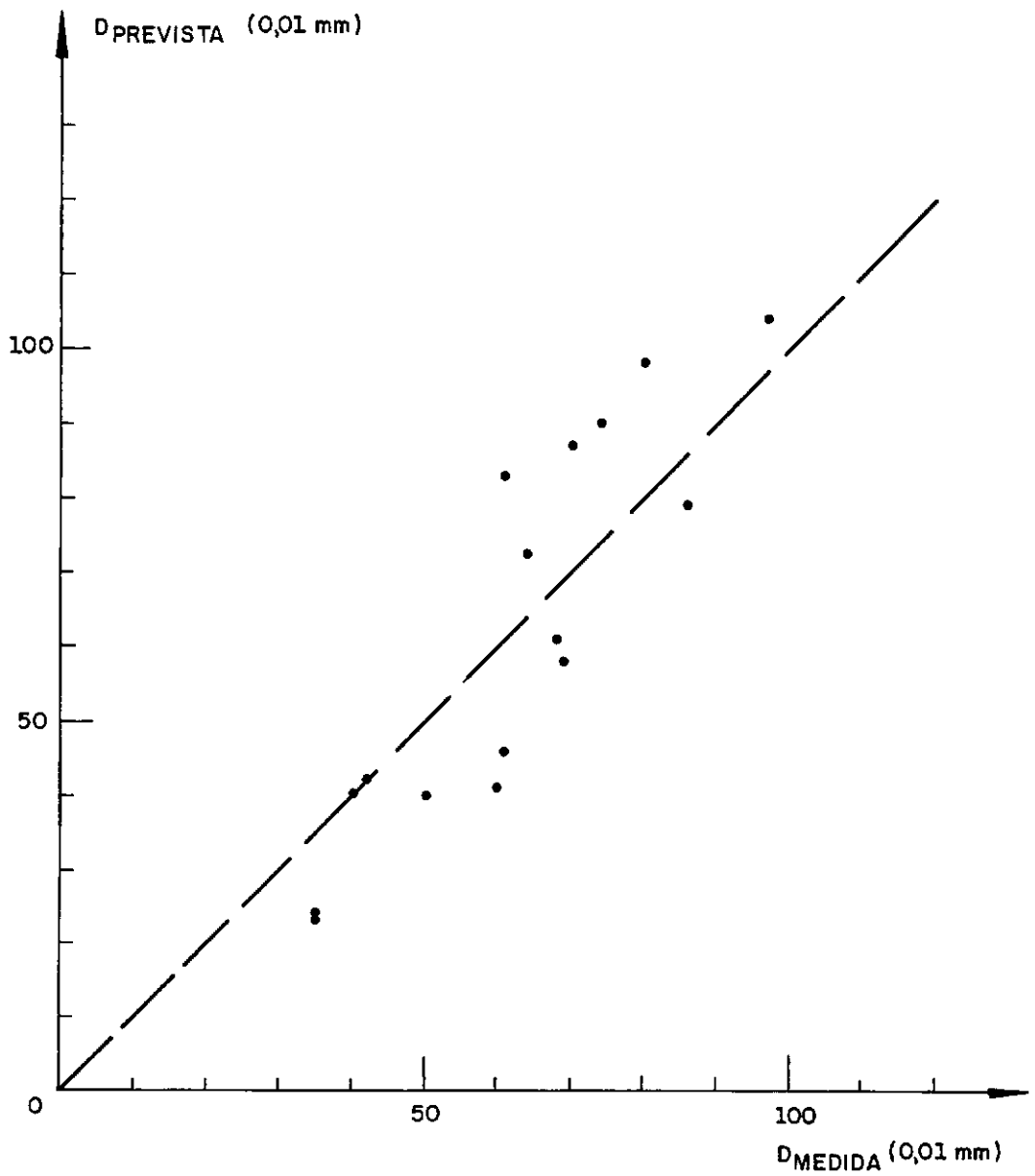


FIGURA IV.4

CAPÍTULO V

NÍVEIS OPERACIONAIS

Quando da utilização de um programa de projeto como o desenvolvido neste trabalho, estarão disponíveis quantidades variáveis de dados sobre a estrutura do pavimento existente, em função da situação prática de sua aplicação. Dessa forma, foram definidos três diferentes níveis de análise para a operação do programa, cuja escolha depende do grau de conhecimento dos parâmetros de resiliência dos materiais e do tipo de pavimento:

Nível A - Quando se dispuser de resultados de ensaios de cargas repetidas (triaxial e compressão diametral) realizados em amostras extraídas do pavimento a ser reforçado.

Neste caso, os módulos das camadas, calculados pelo programa de acordo com o procedimento apresentado no item III.2 e referentes a cada carregamento aplicado, são confiáveis e tem sentido a utilização daquele método.

Nível B - Quando não se realizar ensaios de cargas repetidas e se dispuser somente de uma descrição das várias camadas do pavimento existente, com suas espessuras e classificação dos solos e materiais granulares em função da granulometria e limites de consistência, além do valor CBR dos mesmos.

Neste caso, os parâmetros de resiliência devem ser determinados a partir de classificações disponíveis (como, por exemplo, as que se encontram nas Refs: 1, 2 e 28) ou de correlações. Contudo, como os parâmetros obtidos por esse meio podem não ser confiáveis (especialmente se o projetista não tiver uma boa experiência com os valores que os módulos resilientes dos

diversos materiais podem assumir), o programa adotará um procedimento que dará significação secundária a esses parâmetros.

Inicialmente, é calculado o módulo efetivo do revestimento existente em função da percentagem de área trincada medida em campo, utilizando-se para isso o modelo desenvolvido no item II.6.2 (Fig.II.20). Em seguida, os parâmetros de resiliência (mais ou menos arbitrários) que foram fornecidos, serão utilizados pela subrotina TRESC para a obtenção de uma estrutura de três camadas com módulos constantes. Calcula-se, então, a razão entre os módulos da base e do subleito:

$$K = \frac{M_B}{M_{SL}} \quad (V-1)$$

Alguns métodos de projeto utilizam este fator K, estando o mesmo colocado na forma de âbacos em função de alguns parâmetros da estrutura do pavimento (Ref.29). Assim, quando esse fator for calculado pelo programa, todas as variáveis que podem influir no seu valor estarão sendo levadas em conta.

Admite-se, por hipótese, ser o fator K uma constante característica da estrutura do pavimento. Ele será, portanto, mantido com o valor calculado pela eq.(V-1) em todas as operações posteriores. A partir dele, o programa calcula qual deve ser o módulo da camada de base para que o pavimento existente reproduza a deflexão de projeto, ficando o módulo do subleito dado automaticamente por: $M_{SL} = M_B/K$. A estrutura do pavimento fica, então, modelada como na Fig.V.1.

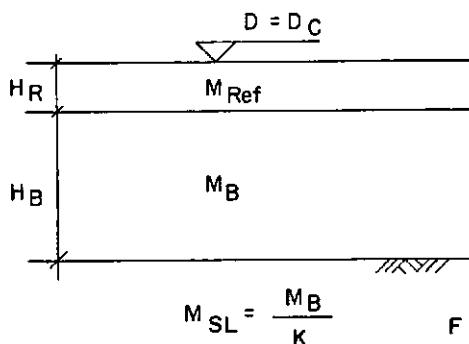


FIGURA V.1

Através deste procedimento, a influência de erros de estimativa ou de julgamento com relação aos parâmetros de resiliência dos materiais será de segunda ordem, uma vez que o fator

K depende tanto dos módulos das camadas como de suas espessuras.

Para todas as operações seguintes, os módulos das camadas permanecerão constantes e iguais aos valores determinados como já descrito (estrutura linear elástica). No caso de pavimentos de aeroportos, os efeitos (importantes) da não-linearidade serão levados em conta, de forma aproximada, determinando-se o fator K a partir dos módulos produzidos nas camadas pela aeronave de deflexão máxima, que é a aeronave crítica em termos de projeto de reforço. O módulo da base M_B é calculado pela aplicação do eixo padrão de 80 kN para que se obtenha a deflexão de projeto.

Nível C - Quando o grau de conhecimento das características estruturais das camadas for idêntico ao do Nível B, em um pavimento rodoviário constituído por revestimento asfáltico e camadas granulares, apoiado num subleito classificado como do tipo I, II ou III (de acordo com a Tabela I.1 ou conforme a nova classificação da Ref.28). Neste caso, serão utilizados os modelos do programa TECNAPAV original, apresentados no item I.2.

O Nível A é recomendável no caso de aeroportos, bem como no de rodovias com cargas de eixo muito pesadas, tendo em vista que os efeitos da não-linearidade do pavimento são mais pronunciados para cargas elevadas. Este procedimento procura levar em conta esses efeitos. Por outro lado, seus resultados só serão significativos se os parâmetros resilientes dos materiais realmente descreverem o comportamento deflectométrico da estrutura do pavimento.

O Nível B se aplica a rodovias em geral. É recomendável a estudos aeroportuários a nível de rede e a rodovias que não se enquadrem nas características das estruturas do Nível C ou àquelas em que a definição do número equivalente de coberturas do eixo padrão de 80 kN para projeto de reforço for dificultada pela existência de um espectro de cargas elevadas, o que cria a necessidade de se obter fatores de equivalência de cargas

adequados ao projeto de reforço. Esta dificuldade é superada pelo cálculo das deflexões produzidas pelas diversas cargas de eixo do tráfego e a aplicação da Lei de Miner.

Pode-se pensar, a princípio, que a forma particular ' que se adota para modelar a estrutura do pavimento tenha pequena influência na deflexão prevista na superfície de uma camada de reforço, desde que se tenha "calibrado" previamente o pavimento original pela deflexão de campo, seja através da espessura efetiva do revestimento, como nos Níveis A e C, ou pelo ajuste dos módulos da base e do subleito, efetuado no Nível B. Para ilustrar como essa influência pode ser grande, seja o exemplo da Fig.V.2, onde se mostra um pavimento cuja deflexão de campo é de 45×10^{-2} mm, com área trincada de 40% e que foi modelado ' de acordo com o que é feito pelos procedimentos A, B e C. As estruturas correspondentes aparecem na Fig.V.3.

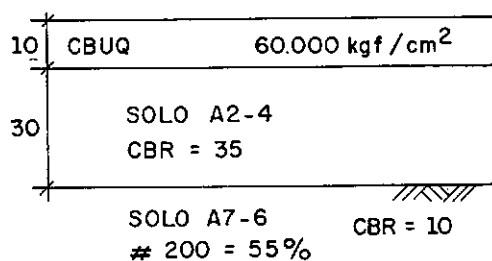


FIGURA V.2

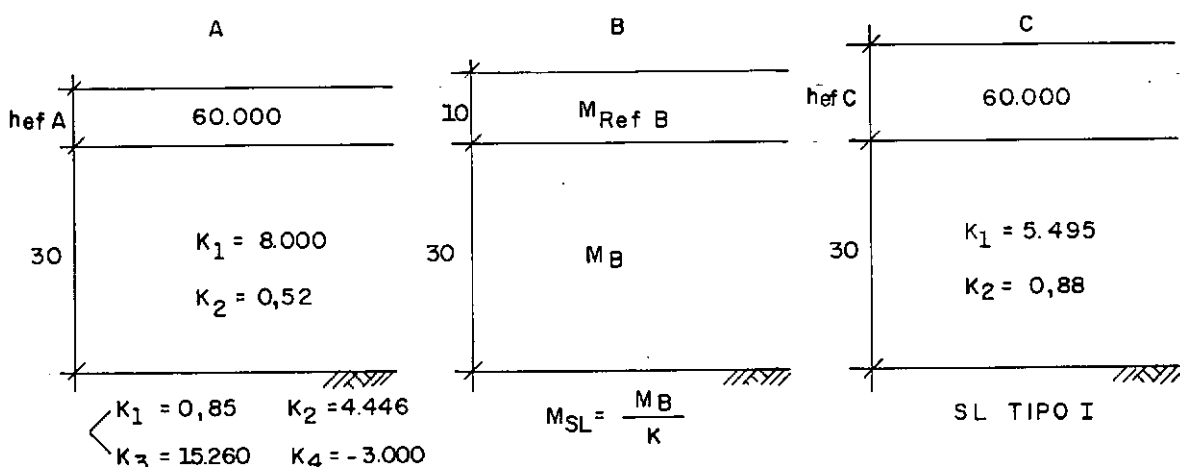


FIGURA V.3

A espessura efetiva para o caso A é dada por (Ref.17):

$$h_{ef} = 4,527 \times 10^8 \cdot D_C^{-1,561} \cdot H_B^{0,6596} \cdot M_{RV}^{-0,4821} \cdot K_1^{-0,5141} \cdot K_2^{1,478} \cdot$$

$$\cdot M_{SL}^{-0,4767} \quad (V-2)$$

e o módulo do subleito (M_{SL}) por:

$$\underline{Q = 2,05 \text{ tf}} \rightarrow \text{eq. (II-19): } \bar{G}_d = 1,663 \times 10^{-2} \cdot M_{SL}^{0,279}$$

$$\text{eq. (III-4): } M_{SL} = 4446 + 15260 \left[0,85 - 1,663 \times 10^{-2} \cdot M_{SL}^{0,279} \right]$$

$$\rightarrow M_{SL} = 13790 \text{ kgf/cm}^2 \rightarrow \text{eq. (II-14): } \bar{M}_{RV} = 10383 \text{ Kgf/cm}^2$$

$$\text{eq. (II-30): } \zeta = 1,2566 \rightarrow \text{eq. (II-31): } \bar{Q} = 2,85 \text{ tf}$$

$$\underline{\bar{Q} = 2,85 \text{ tf}} \rightarrow \text{eq. (II-19): } \bar{G}_d = 2,3527 \times 10^{-2} \cdot M_{SL}^{0,279}$$

$$\text{eq. (III-4): } M_{SL} = 4446 + 15260 \left[0,85 - 2,3527 \times 10^{-2} \cdot M_{SL}^{0,279} \right]$$

$$\Rightarrow M_{SL} = 12435 \text{ Kgf/cm}^2 //$$

Pela eq. (V-2): $h_{efA} = 2,3 \text{ cm}$.

Para 40% de área trincada, o módulo efetivo do revestimento, a ser utilizado no Nível B, será (Fig.II.20):

$M_{RefB} = 0,50 \times 60.000 = 30.000 \text{ Kgf/cm}^2$. O módulo equivalente da base granular, a ser utilizado no cálculo do fator $K = M_B / M_{SL}$, será dado pela eq. (II-13): $M_B = \bar{M}_{RD} = 696 \text{ Kgf/cm}^2$. Assim:

$$K = \frac{M_B}{M_{SL}} = \frac{696}{12.435} = 0,056$$

O módulo da base que faz com que a estrutura reproduza a deflexão de campo é dado por:

$$M_B = 6,0075 \times 10^7 \cdot D_C^{-1,4669} \cdot H_R^{-1,1487} \cdot H_B^{0,1017} \cdot M_{RefB}^{-0,4184} \cdot K^{0,5937} \cdot$$

$$.Q^{1,3531}$$

(V-3)

que é a eq.(II-2) transformada pela eq.(V-1). Assim:

$$M_B = 190 \text{ Kgf/cm}^2 \quad \text{e} \quad M_{SL} = \frac{M_B}{K} = 3.390 \text{ Kgf/cm}^2$$

Para o Nível C, deve-se calcular apenas a espessura efetiva do revestimento existente, pela eq.(I-1):

$$hef_C = 12,2 \text{ cm}$$

Neste ponto, o perfil da Fig.V.2 está "calibrado" pela deflexão de campo de acordo com os três procedimentos, restando agora o cálculo da deflexão prevista na superfície de uma camada de reforço aplicada sobre o pavimento. Os resultados obtidos para várias espessuras de reforço aparecem na Tabela V-1.

H _{REF} (cm)	DEFLEXÃO PREVISTA (0,01mm)		
	A	B	C
4	20	38	36
10	12	31	27
20	8	24	18

Tabela V-1

Desses resultados, observa-se que as deflexões dos procedimentos B e C foram próximas, enquanto aquela prevista pelo procedimento A distanciou-se das demais. O que se pode concluir é que, se os parâmetros de resiliência dos materiais das camadas forem realmente aqueles da Fig.V.3 para o Nível A, então os valores mais confiáveis para as deflexões serão aqueles previstos pelo procedimento A. Por outro lado, se esses parâmetros forem desconhecidos, então as deflexões previstas pelos procedimentos B e C deverão ser mais dignas de crédito.

Dessa forma, o Nível A só deve ser utilizado em situações onde o nível de conhecimento das propriedades resilientes dos materiais das camadas do pavimento for elevado. Caso isto não ocorra, deve ser aplicado o Nível B ou o Nível C, a escolha sendo função do tipo do pavimento (aeroportuário ou rodoviário, respectivamente).

CAPÍTULO VI

APLICAÇÃO DO PROGRAMA

Como exemplo de aplicação do programa desenvolvido a pavimentos aeroportuários, seja aquele mostrado na Fig. VI.1. Os dados requeridos pelo programa são:

I. Nível de Operação

Variável NA = 1 (Nível A)

II. Pavimento Original

Número de camadas = 6

Número de camadas asfálticas e cimentadas = 3

Deflexão de projeto = 40×10^{-2} mm

Percentagem de área trincada = 15%

DESCRIÇÃO			CAMADA	CÓDIGO	γ (kgf/cm ³)
CBUQ	$M_R = 40.000 \text{ kgf / cm}^2$	10 cm	1	1	$2,3 \times 10^{-3}$
PMQ	$M_R = 15.000 \text{ kgf / cm}^2$	15 cm	2	1	$2,1 \times 10^{-3}$
CBUQ ANTIGO	$M_R = 60.000 \text{ kgf / cm}^2$	10 cm	3	1	$2,3 \times 10^{-3}$
BRITA GRADUADA	$M_R = 5495 \text{ G}_3^{0,88}$	30 cm	4	2	$2,2 \times 10^{-3}$
SUB-BASE	$M_R = 7.500 \text{ G}_3^{0,80}$	40 cm	5	2	$2,1 \times 10^{-3}$
SUBLEITO	$M_R = f(\text{G}_d) \begin{cases} K_1 = 0,78 & K_2 = 1150 \\ K_3 = 2.860 & K_4 = -162 \end{cases}$		6	3	—

FIGURA VI.1

III. Tráfego Aeroportuário

Número de aeronaves = 2

Características: Tabela VI.1

Configuração do trem-de-pouso principal:

Aeronave 1 (B727-100): rodas duplas ($D_T = 86,4\text{cm}$)

Aeronave 2 (B707-320C): duplo tandem ($D_L = 142,2\text{cm}$

e $D_T = 87,6\text{cm}$)

Tabela VI.1

AERONAVE	PESO BRUTO (tf)	PRESSÃO DE INFL. (Kgf/cm ²)	NÚMERO ANUAL DE OPERAÇÕES	RELAÇÃO PASSAGEM/COBERTURA
1	77,2	11,7	10.000	3,48
2	152,5	12,7	5.000	1,84

IV. Condições Técnicas

Período de análise = 10 anos

Data base = 08/1987

Vida útil mínima para solução em CBUQ = 4 anos

Espessura mínima de CBUQ a ser adotada de uma só
vez = 4 cm

Espessura máxima de CBUQ a ser adotada de uma só
vez = 15 cm

Espessura total máxima de CBUQ ao longo do período
de análise = 30 cm

V. Custos

Taxa de oportunidade do capital = 12%

Custo por metro cúbico do CBUQ = 100

Custo por metro quadrado da lama asfáltica = 1

A saída do programa é mostrada a seguir:

ESTRATÉGIAS DE RESTAURAÇÃO E CONSERVAÇÃO
SERÃO FORNECIDAS NO MÁXIMO 5 ESTRATÉGIAS

ESTRATÉGIA 1

9 cm de CBUQ em 08/1987

Lama ou TSD em 04/1996

Custo total em CZ\$/m² 9,38

Valor presente da construção futura

ESTRATÉGIA 2

6 cm de CBUQ em 08/1987

Lama ou TSD em 11/1991

6 cm de CBUQ em 03/1994

Custo total em CZ\$/m² 9,47

ESTRATÉGIA 3

7 cm de CBUQ em 08/1987

Lama ou TSD em 02/1993
6 cm de CBUQ em 02/1996
Custo total em CZ\$/m² 9,84

ESTRATÉGIA 4

8 cm de CBUQ em 08/1987
Lama ou TSD em 06/1992
5 cm de CBUQ em 02/1995
Custo total em CZ\$/m² 10,71

Como exemplo de aplicação a rodovias, seja o pavimento mostrado na Fig. VI.2, para o qual valem as mesmas condições técnicas do exemplo anterior e cujos demais dados são:

Pavimento Original

Número de camadas = 5
Número de camadas asfálticas e cimentadas = 2
Deflexão de projeto = 70×10^{-2} mm
Porcentagem de área trincada = 50%

Tráfego

Número equivalente de repetições do eixo padrão rodoviário de 80 kN, no primeiro ano = 1×10^6

Este problema, analisado pelos três procedimentos (A, B e C), teve uma solução única de 4 cm de CBUQ a serem aplicados na data base.


DESCRIÇÃO			CAMADA	CÓDIGO	γ' (kgf/cm ³)
CAPA	$M_R = 30.000 \text{ kgf / cm}^2$	4 cm	1	1	$2,3 \times 10^{-3}$
BINDER	$M_R = 25.000 \text{ kgf / cm}^2$	6 cm	2	1	$2,3 \times 10^{-3}$
BRITA GRADUADA	$M_R = 5495 \text{ } \sigma_3^{0,88}$	30cm	3	2	$2,2 \times 10^{-3}$
SUB-BASE	$M_R = 7.500 \text{ } \sigma_3^{0,80}$	40 cm	4	2	$2,1 \times 10^{-3}$
SUBLEITO	 $M_R = f(\sigma_d) \begin{cases} K_1 = 0,78 & K_2 = 1150 \\ K_3 = 2.860 & K_4 = -162 \end{cases}$		5	3	—

FIGURA VI. 2

CAPÍTULO VII

COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES

- (1) Em virtude do atual nível de desenvolvimento das técnicas computacionais, as análises mecânicas das estruturas de pavimento tornaram-se viáveis. Existem diversas formas de se modelar o pavimento para tal análise. O sistema de camadas linear elástico tem a vantagem da simplicidade, mas exige que as camadas sejam horizontalmente infinitas, homogêneas e isotrópicas, além de permitir o desenvolvimento de tensões de tração em materiais granulares. O método dos elementos finitos, por outro lado, permite a modelagem mais realística, levando-se em conta a não-linearidade, a anisotropia e a largura finita do pavimento, mas é oneroso sob o ponto de vista da aplicação generalizada em um método de projeto, por requerer tempo considerável para se efetuar a análise de uma única seção do pavimento, mesmo onde hajam facilidades computacionais e seu custo não seja elevado. Assim, sugere-se que o procedimento mais viável para o compromisso entre a exatidão da análise e a sua viabilidade prática, dentro de um método de projeto, é o que foi apresentado neste trabalho, ou seja, uma solução de camadas lineares elásticas acoplada a um procedimento iterativo para levar em conta o comportamento não-linear. Este método iterativo é análogo ao que é usado na teoria de elementos finitos, quando a resposta do pavimento é calculada inicialmente assumindo os módulos de cada camada, as tensões calculadas são então usadas para estimar o módulo a partir dos modelos de resiliência determinados em laboratório, e a resposta do pavimento é novamente calculada, por um processo incremental (método da matriz de rigidez tangente), de modo que o módulo de cada elemento corresponda ao seu respectivo estado de tensões. A técnica iterativa aqui desenvolvida utiliza em cada camada um módulo que é determinado em função do estado de tensões médio que existe sob as cargas de roda aplicadas. Esta análise não-linear simplificada torna o tra

tamento de um grande número de seções de pavimento viável a um custo computacional baixo e sem as dificuldades inerentes a uma modelagem do pavimento por elementos finitos que leve em conta a não-linearidade e a ação de cargas de rodas múltiplas.

(2) No cálculo do módulo das camadas de comportamento não-linear pelo procedimento apresentado, são utilizadas tensões calculadas pelo programa FEPAVE2. Uma série de evidências disponíveis indica que a deformada de superfície obtida em campo com a viga Benkelman concorda com a que é prevista pelo programa FEPAVE2. Resta, ainda assim, a questão de se isto garantiria que as tensões por ele calculadas se aproximam das tensões de campo produzidas quando da passagem de um veículo. Contudo, mesmo que tal não ocorra, isto não importa para a validade do procedimento de cálculo adotado neste trabalho, uma vez que estas tensões são utilizadas apenas intermediariamente para o cálculo dos módulos das camadas não-lineares. Como as equações para o cálculo das tensões foram obtidas a partir do FEPAVE2, o procedimento adotado é apenas uma simplificação do que faz esse programa internamente ao calcular o módulo de cada elemento da malha de elementos finitos. Os módulos aqui calculados são, por sua vez, utilizados apenas para se calcular a deflexão do pavimento. Como esta concorda com a que é medida em campo, o método adotado pode ser considerado como válido.

(3) Para a previsão correta das deflexões produzidas pelas cargas de eixo ou de trem-de-pouso mais pesadas, é fundamental que se leve em conta a não-linearidade das relações tensão-deformação para os solos e materiais granulares, uma vez que é nestes níveis de carga que a não-linearidade do pavimento como estrutura se torna mais pronunciada, como é ilustrado na Fig.VII.1.

Ao mesmo tempo, se o comportamento é acentuadamente não-linear, deixa de ser válido o princípio da superposição dos efeitos e não se pode somar as deflexões produzidas pelas várias rodas de um trem-de-pouso. A utilização da Carga de Roda Simples Equivalente elimina este problema, embora seja

um procedimento também aproximado. Como são justamente as cargas mais pesadas as principais responsáveis pela deterioração prematura dos pavimentos asfálticos, vê-se que a previsão correta das deflexões produzidas por essas cargas é que permitirá uma estimativa razoável da vida de serviço do pavimento. Essa previsão, contudo, só pode ser feita se a contribuição de cada camada do pavimento na deflexão total for avaliada o mais corretamente possível, o que depende do módulo médio de cada uma. Este, por sua vez, é função da carga aplicada, já que cargas diferentes produzirão módulos diferentes nas camadas de comportamento não-linear. Justifica-se, assim, a ênfase dada neste trabalho para que se considerasse todas as camadas do pavimento e a ação particular de cada uma das cargas do tráfego.

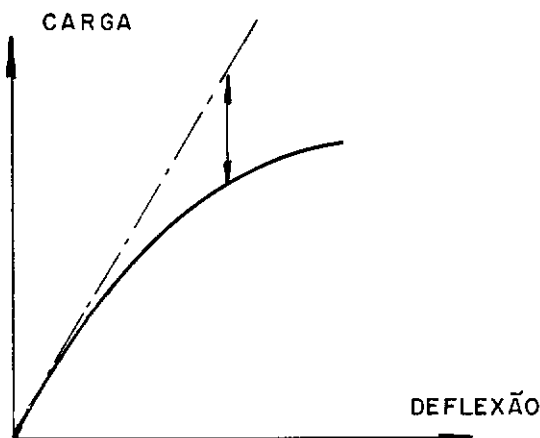


FIGURA VII.1

- (4) Como sugestão para futuros aperfeiçoamentos do trabalho aqui apresentado, pode-se citar a substituição do procedimento para transformação do sistema linear elástico de múltiplas camadas em um equivalente de três ou duas camadas por uma subrotina que calcule as deflexões diretamente no sistema de n camadas, eliminando a necessidade dos métodos aproximados que foram aplicados neste trabalho. Para que isto seja prático, contudo, o processo deverá consistir de uma solução cujo tempo computacional seja curto, visto que o mesmo será utilizado dezenas de vezes em um único projeto. Uma solução como a do "Método das Camadas Finitas" parece adequada, tendo em vista sua comprovada eficiência (Ref.30).

APÊNDICE

LISTAGEM DO PROGRAMA

```

10 PRINT "PROGRAMA TECNAPAV PARA PAVIMENTOS FLEXIVEIS E SEMI-RIGIDOS
PRINT:PRINT
20 PRINT "ENTRADA DE DADOS": PRINT
25 PRINT "NIVEL DE OPERACAO": PRINT "A(1),B(2) OU C(3)": INPUT NA: PRINT: PRINT
27 IF NA=3 THEN 111
30 PRINT "NUMERO DE CAMADAS DO PAVIMENTO":INPUT N
35 DIM MR(N),K1(N),K2(N),C1(N),C2(N),C3(N),C4(N),H(N),G(N)
40 PRINT "NUMERO DE CAMADAS ASFALTICAS E CIMENTADAS":INPUT NC:PRINT
50 PRINT "PROPRIEDADES DE CADA CAMADA":PRINT
60 FOR I=1 TO N:MR(I)=0!:K1(I)=0!:K2(I)=0!:C1(I)=0!:C2(I)=0!:C3(I)=0!:C4(I)=0:PRINT
70 PRINT "CAMADA":I: PRINT "CODIGO": INPUT IC(I): IF I<N THEN PRINT "ESPESSURA (CM)": INPUT H(I):
M3:I: INPUT G(I)
80 IF IC(I)=1 THEN PRINT "MODULO RESILIENTE (KGF/CM2)":INPUT MR(I)
90 IF IC(I)=2 THEN PRINT "PARAMETROS K1 E K2":INPUT K1(I),K2(I)
100 IF IC(I)=3 THEN PRINT "PARAMETROS K1,K2,K3 E K4":INPUT C1(I),C2(I),C3(I),C4(I)
110 NEXT I:PRINT:PRINT: GOTO 120
111 PRINT "ESPESSURA TOTAL DA(S) CAMADA(S) GRANULAR(ES) (CM)": INPUT HG: PRINT
112 PRINT "TIPO DO SUBLEITO: I(1), II(2) OU III(3)": INPUT TS: PRINT
113 IF HG<45! THEN Y3=0 ELSE Y3=1
114 IF TS=1 THEN Y1=0: Y2=0
115 IF TS=2 THEN Y1=1: Y2=0
116 IF TS=3 THEN Y1=0: Y2=1
117 PRINT "NUMERO DE OPERACOES NO PRIMEIRO ANO DO EIXO PADRAO DE 8.2 tf": INPUT PTE: GOTO 207
120 PRINT "TRAFEGO AEROPORTUARIO":PRINT
130 PRINT "ENTRE COM O (ZERO) SE NAO SERAO UTILIZADOS FATORES DE EQUIVALENCIA DE CARGAS":INPUT IV
140 PRINT "NUMERO DE AERONAVES": INPUT NR:PRINT
150 DIM P(NR),R(NR),NP(NR),D(NR,25),MG(NR),QR(NR),DELTA(NR),MF(NR),FEC(NR),N1(NR),PC(NR),RP(NR),DB(NR)
160 FOR I=1 TO NR:PRINT:PRINT "AERONAVE":I
165 PRINT "PESO BRUTO (TON)":INPUT P(I):PRINT "PRESSAO DE INFLACAO DOS PNEUS (KGF/CM2)": INPUT PC(I)
170 PRINT "RELACAO PASSAGEM/COBERTURA":INPUT RP(I):PRINT "NUMERO ANUAL DE OPERACOES":INPUT NP(I)
175 IF IV<0 THEN PRINT "FATOR DE EQUIVALENCIA DE CARGAS":INPUT FEC(I): GOTO 200
180 PRINT "NUMERO DE RODAS DO TREM-DE-POUSO PRINCIPAL":INPUT N1(I):N1(I)=N1(I)/2
181 IF N1(I)=1 THEN 200
182 PRINT "NUMERO DE RODAS QUE INFLUENCIAM A BACIA DE DEFORMACAO":INPUT NB(I)
183 PRINT "DISTANCIA(S) ENTRE A(S) OUTRA(S)":NB(I)-1;"RODA(S) E A RODA DE REFERENCIA(CM)";
184 FOR J=1 TO NB(I)-1:INPUT D(I,J):NEXT J
200 NEXT I:AP=1:PRINT
205 IF IV<0 THEN PRINT "AERONAVE DE PROJETO":INPUT AP
207 PRINT:PRINT
210 PRINT "DEFLEXAO DE PROJETO (0.01MM)":INPUT DC
215 PRINT "PERCENTAGEM DE AREA TRINCADA (%)": INPUT TC
220 PRINT "DATA BASE (MES/ANO)":INPUT MES,ASE: ASE=ASE+(MES/12)
230 PRINT "PERIODO DE ANALISE(ANOS)":INPUT PA
240 PRINT "VIDA UTIL MINIMA PARA SOLUCAO EM CBUQ(ANOS)":INPUT VJM
250 PRINT "ESPESSURA MINIMA DE CBUQ A SER ADOPTADA DE UMA SO VEZ (CM)":INPUT H1
260 PRINT "ESPESSURA MAXIMA DE CBUQ A SER ADOPTADA DE UMA SO VEZ (CM)":INPUT H2
270 PRINT "ESPESSURA TOTAL MAXIMA DE CBUQ AO LONGO DO PERIODO DE ANALISE(CM)": INPUT H0:PRINT:PRINT
280 PRINT "CUSTOS":PRINT
290 PRINT "TAXA DE OPORTUNIDADE DO CAPITAL":INPUT COC
300 PRINT "CUSTO POR METRO CUBICO DO CBUQ":INPUT CS
310 PRINT "CUSTOS POR METRO QUADRADO DA LAMA ASFALTICA":INPUT CLA:PRINT:PRINT
312 IF NA=3 THEN 325
315 GOSUB 8000
316 PI=3.141592654
320 REM CALCULO DA ESPESSURA EFETIVA DO REVESTIMENTO EXISTENTE
325 IF NA=3 AND HG<45! THEN HF=-5.737+(807.961/DC)+.972*Y1+4.10!*Y2
326 IF NA=3 AND HG>45! THEN HF=-2.382+(984.938/DC)+.236*Y1+1.26*Y2
327 IF NA=3 THEN 860

```



```

330 REM CAMADA CIMENTADA EQUIVALENTE
335 IF NC+1=N THEN CN=NC-1:H(NC+1)=H(NC): ME=MR(NC):ELSE CN=NC
340 HE=0:FOR I=1 TO CN:HE=HE+H(I):NEXT I
343 IF NC+1<N AND IC(NC+1)=1 THEN ME=MR(NC+1)
345 IF NC=1 THEN E=MR(1):HE=H(1):GOTO 371
350 HA=H(1):E=MR(1)
360 FOR I=2 TO CN:E=((H(I)*(MR(I)^(1/3))+HA*(E^(1/3)))/(H(I)+HA))^3
370 HA=HA+H(I):NEXT I
371 IF NR=1 THEN QR(1)=(.95*P(1))/(2*NI(1)): Q=QR(1) : II=1 : GOTO 377
372 FOR II=1 TO NR : QR(II)=(.95*P(II))/(2*NI(II)) : NEXT II
373 AM=1 : FOR II=1 TO NR-1
374 IF QR(AM)=QR(II+1) THEN 375 ELSE AM=II+1
375 NEXT II
376 Q=QR(AM) : II=AM : AP=AM
377 R(II)=SQR((1000*Q)/(PI*PC(II)))
379 REM SELECAO DO MODELO PARA CALCULO DE DEFLEXOES
380 CP=0:HR=HE:M=E:GOSUB 5000
381 IF IC(NC+1)=1 OR NC+1=N THEN 387
382 QD=Q*B=.018007*(HR^.663)*(H(NC+1)^-.7434)*(M^.6924)*(ML^-.4577)*(K1(NC+1)^.7814)*(K2(NC+1)^-2.293)
383 D=4.8793*(HR^-.8058)*(M^-.3593)*(ML^.432)*(Q^.1716)
384 ME=B*(QD^.3063):ED=D*(ME^-.07506)
385 QD=Q : FOR J=1 TO NB(II)-1 : QD=QD+Q*EXP(-(D(II,J)/R(II))*ED) : NEXT J
386 IF ABS(QD-QD)>.05 THEN QD=QD:GOTO 384
387 K=ME/ML : ID=0 : IF K<.85 OR (HR/R(II))<.35 OR (HR/R(II))>3.5 OR (H(NC+1)/R(II))>6.5 THEN 388 ELSE ID=2
388 IF H(NC+1)<10! OR H(NC+1)>60! OR E<15000! OR E>80000! OR ML<250! OR ML>5000! OR HE<2.5 OR HE>40! THEN 11
389 IF NC+1=N OR (NC+1<N AND IC(NC+1)=1) THEN 391
390 IF K1(NC+1)<2000! OR K1(NC+1)>10000! OR K2(NC+1)<.4 OR K2(NC+1)>1.1 THEN ID=1: GOTO 392:ELSE 392
391 IF ME<150! OR ME>6000! THEN ID=1
392 IF NA=2 THEN 841
393 CP=1 : M=E : HR=HE : GOSUB 5000
394 IF NC+1=N OR IC(NC+1)=1 THEN 530 : REM NIVEL A
400 REM CASO DE BASE GRANULAR
440 HF=4.5275E+08*(DC^-.1.5613)*(H(NC+1)^.65964)*(E^-.48212)*(ML^-.47666)*(K1(NC+1)^-.51413)*(K2(NC+1)^1.4775)
450 IF HF<2! THEN FH=2! ELSE FH=HF
460 MB=.12925*(FH^.2693)*(H(NC+1)^-.8207)*(E^.3831)*(ML^-.3152)*(K1(NC+1)^.9415)*(K2(NC+1)^-2.706)
470 ED=4.8793*(FH^-.8058)*(E^-.3593)*(ML^.432)*(MB^-.07506)*(2.05^.1716)
480 QE=2.05*(1+EXP(-(30!/10.8)*ED))
483 IF ID=2 THEN ME=MB : GOTO 530
485 IF ID=1 THEN ME=MB:GOTO 606
490 HA=5908400!*(DC^-.1.277)*(H(NC+1)^.0885)*(E^-.3642)*(MB^-.35372)*(ML^-.5168)*(QE^1.1779):CX=CX+1
500 IF HF<15! THEN FH=HA : GOTO 614
510 IF HF<15! AND ABS(HA-HF)>2! AND CX<=2 THEN FH=HA : GOTO 470
520 HF=HA : GOTO 614
530 REM CASO DE BASE LINEAR (MODULO CONSTANTE)
540 A=5908400!*(DC^-.1.277)*(H(NC+1)^.0885)*(E^-.3642)*(ME^-.35372)*(ML^-.5168) : Q=2.5
550 HA=A*(Q^1.1779)
560 IF HA<2! THEN FH=2! ELSE FH=HA
570 ED=4.8793*(FH^-.8058)*(E^-.3593)*(M^.432)*(ME^-.07506)*(2.05^.1716)
580 QL=2.05*(1+EXP(-(30!/10.8)*ED))
590 IF ABS(QL-Q)>.05 THEN Q=QL : GOTO 550
595 QE=QL : IF ID=1 THEN 606
600 HF=HA : GOTO 614
606 REM SOLUCOES PARA SISTEMA DE DUAS CAMADAS
607 E1=ME : E2=ML : RM=E1/E2 : HH=H(NC+1) : A=10.8+HE*TAN(PI/6) : P=5.6 : RE=HH/A : IT=3 : GOSUB 4000
608 EN=(1.68*P*A)/(D/1000)
609 HF=HE : P=(1000*QE)/(PI*(10.8^2)) : E1=E : E2=EN : RM=E1/E2 : IT=4: A=10.8
610 RE=HF/10.8 : GOSUB 4000
611 S=(D-DC)/DC : S=ABS(S) : IF S<.05 THEN 614

```

```

612 IF D>DC THEN HF=HF*(1+.9*S) : GOTO 610
613 HF=HF*(1-.9*S) : GOTO 610
614 IF HF<1! THEN HF=1!
615 IF IV=0 THEN 660
620 CP=0 : HR=HF : II=AP : M=E
630 Q=(.95*P(II))/(2*NI(II))
640 GOSUB 5000
650 MP=ML : GOTO 810
660 CP=0 : HR=HF : M=E
665 REM MODULO DO SUBLEITO PRODUZIDO PELA AERONAVE AP
670 II=AP : Q=QR(AP) : GOSUB 5000
680 MB(AP)=ML
690 GOTO 850
700 MB(II)=ML
800 REM CALCULO COM FATORES DE EQUIVALENCIA DE CARGAS
810 PTB=0!
820 FOR I=1 TO NR
830 PTB=PTB+FEC(I)*(WF(I)/RP(I))
840 NEXT I:GOTO 850
841 M0=E : GOSUB 9000 : REM NIVEL B
842 Q=2.05 : S=6.0075E+07*(DC^-1.4669)*(HE^-1.1487)*(H(NC+1)^.1017)*(MF^-1.4184)*(K^1.5937)
843 D=4.8793*(HE^-1.8059)*(MF^-1.3593)*(2.05^1.1716)
844 MB=B*(Q^1.3531) : ED=D*((MB/K)^.432)*(MB^-1.07506) : QD=2.05*(1+EXP^-(30!/10.8)*ED))
845 S=ABS(QD-Q) : IF S>.05 THEN Q=QD : GOTO 844
846 ML=MB/K : HF=HE : IC(NC+1)=1 : ME=MB : E=MF
847 IF IV<>0 THEN 810
848 IF ID<>0 THEN 850
849 IF ME<150! OR ME>6000! OR ML<250! OR ML>5000! THEN ID=1
850 REM PROGRAMA TECNAPAV AEROPORTUARIO
855 IF NR=1 THEN AP=1 : QR(AP)=(.95*P(AP))/(2*NI(AP)) : R(AP)=SQRT((1000*QR(AP))/(PI*PC(AP))) : GOTO 860
856 FOR II=1 TO NR
857 QR(II)=(.95*P(II))/(2*NI(II)) : R(II)=SQRT((1000*QR(II))/(PI*PC(II)))
858 NEXT II
860 DIM DP(3),RT(3),ANO(3),HT(3),PRECO(5),PERF(5,3),CLPERF(5,3),GUARDA(5),TT(5),A25(3),RH(3),ERF(5,3),CD(5,3)
870 PRINT : KDDIG=0 : YEAR=0! : KY=0
880 FOR J=1 TO 3:HT(J)=0!:A25(J)=0!:NEXT J
890 HT(1)=1!:FOR IND=1 TO 5:PRECO(IND)=0!:NEXT IND
900 IND=0:CP=0
910 HT(1)=HF
920 RH(1)=H! : VUM=VUM/.65
930 ANO(2)=0!:A25(2)=0!:A25(3)=0!
940 ANO(3)=0 :CONT=0 :ST=PA:RH(2)=0!:RH(3)=0!
941 IF NA=3 THEN RF=RH(1) : GOSUB 7500
942 IF NA=3 THEN 977
943 IF ID=2 THEN T1=RH(1) : E1=30000! : T2=HT(1) : E2=E : T3=H(NC+1)
945 HR=RH(1)+HT(1):M=((30000!^(1/3))*RH(1)+HT(1))*(E^(1/3))/HR^3
946 IF IV<> 0 THEN 975
947 IF RH(1)=H1 OR RH(1)=H1+3 OR RH(1)=H1+6 OR RH(1)=H1+9 OR RH(1)=H1+12 OR RH(1)=H1+15 OR RH(1)=H1+18 OR RH(1)=H1+21
975
950 IF NR=1 THEN AP=1:RC(1)=1!: GOTO 971
951 FOR II=1 TO NR
952 Q=QR(II): IF NA=1 THEN GOSUB 5000
953 MS=ML:IT=0:E4=ML :GOSUB 4000
954 DELTA(II)=Q
955 NEXT II
956 FOR II=1 TO NR
957 IF HR=16! THEN RC(II)=(DELTA(AP)/DELTA(II))^3.31915 ELSE RC(II)=(DELTA(AP)/DELTA(II))^3.9215686
958 NEXT II

```

```

970 REM CALCULO DO NUMERO EQUIVALENTE DE COBERTURAS ANUAIS DA AERONAVE DE CARGA DE RODA MAXIMA (PTB)
971 PTB=0
972 FOR II=1 TO NR
973 PTB=PTB+RC(II)*(NP(II)/RP(II))
974 NEXT II: IF NA=2 THEN MS=AP:ML:II=AP:Q=QR(AP):GOTO 976:ELSE ML=MS(AP):II=AP:Q=QR(AP):GOTO 976
975 II=AP:Q=QR(AP):IF NA=1 THEN GOSUB 5000:REM DURACAO DO PRIMEIRO RECAPEAMENTO
976 MS=ML:IT=0:E4=ML:GOSUB 4000
977 RF=RH(1):GOSUB 4300
980 AND(1)=RN/PTB
990 IF AND(1)>=VUM THEN 1030
1000 RH(1)=RH(1)+1
1010 IF RH(1)>HX THEN 1470
1020 GOTO 930
1030 NN=2:HH=RH(1):HM=E:HR=HT(1): IF NA=3 THEN 1040 ELSE GOSUB 2000
1040 CCNT=CCNT+RH(1)
1050 IF AND(1)=ST THEN 1430
1060 ST=ST-AND(1):RH(2)=HI
1061 IF NA=3 THEN RF=RH(2):HF=HT(1)+RH(1):GOSUB 7500
1062 IF NA=3 THEN 1092
1063 IF ID=2 THEN T1=RH(2):E1=30000: T2=HT(1)+RH(1):E2=MF: T3=H(NC+1)
1065 HR=RH(2)+RH(1)+HT(1):M=((RH(1)+HT(1))*(MF^(1/3))+RH(2)*(30000^(1/3)))/HR^3
1066 IF IV<>0 THEN 1090
1067 IF RH(2)=HI OR RH(2)=HI+3 OR RH(2)=HI+6 OR RH(2)=HI+9 OR RH(2)=HI+12 OR RH(2)=HI+15 OR RH(2)=HI+18 OR F
E 1090
1070 IF NR=1 THEN AP=1:RC(1)=1:GOTO 1085
1071 FOR II=1 TO NR
1072 Q=QR(II):IF NA=1 THEN GOSUB 5000
1073 MS=ML:IT=0:E4=ML:GOSUB 4000
1074 DELTA(II)=D
1075 NEXT II
1076 FOR II=1 TO NR
1077 IF HR<=10: THEN RC(II)=(DELTA(AP)/DELTA(II))^5.31915 ELSE RC(II)=(DELTA(AP)/DELTA(II))^3.9215686
1078 NEXT II
1080 REM CALCULO DE PTB
1085 PTB=0
1086 FOR II=1 TO NR
1087 PTB=PTB+RC(II)*(NP(II)/RP(II))
1088 NEXT II:ML=MS(AP):II=AP:Q=QR(AP):GOTO 1091
1089 REM DURACAO DO SEGUNDO RECAPEAMENTO
1090 II=AP:Q=QR(AP):IF NA=1 THEN GOSUB 5000
1091 MS=ML:IT=0:E4=ML:GOSUB 4000
1092 RF=RH(2):GOSUB 4300
1095 AND(2)=RN/PTB
1110 IF AND(2)>=VUM THEN 1150
1120 RH(2)=RH(2)+1
1130 IF RH(2)>HX THEN 1000
1140 GOTO 1061
1150 NN=3:HH=RH(2):HR=HT(1)+RH(1): IF NA=3 THEN 1160 ELSE GOSUB 2000
1160 CCNT=CCNT+RH(2)
1170 IF CCNT>HD THEN 1000
1180 IF AND(2)=ST THEN 1250
1190 KY=1: A25(1)=.65*AND(1)
1200 A25(2)=.65*AND(2)+AND(1)
1210 IF AND(3)<>0 THEN A25(3)=.65*AND(3)+AND(2)+AND(1)
1220 GOSUB 2500
1230 GOSUB 3000
1240 GOTO 1000
1250 ST=ST-AND(2):RH(3)=HI

```

```

1251 IF NA=3 THEN RF=RH(3) : HF=HT(1)+RH(1)+RH(2) : GOSUB 7500
1252 IF NA=3 THEN 1281
1253 IF ID=2 THEN T1=RH(3) : E1=30000! : T2=RH(2)+RH(1)+HT(1) : E2=MF : T3=H(NC+1)
1255 HR=RH(3)+RH(2)+RH(1)+HT(1):M=((30000!^(1/3))+RH(3)+(HR-RH(3))*(MF^(1/3)))/HR^3
1256 IF IV<>0 THEN 1279
1257 IF RH(3)=HI OR RH(3)=HI+3 OR RH(3)=HI+6 OR RH(3)=HI+9 OR RH(3)=HI+12 OR RH(3)=HI+15 OR RH(3)=HI+18 OR
E 1280
1260 IF NR=1 THEN AP=1:RC(1)=1!:GOTO 1275
1261 FOR II=1 TO NR
1262 Q=QR(II):IF NA=1 THEN GOSUB 5000
1263 MS=ML:IT=0:E4=ML:GOSUB 4000
1264 DELTA(II)=D
1265 NEXT II
1266 FOR II=1 TO NR
1267 IF HR<=10! THEN RC(II)=(DELTA(AP)/DELTA(II))^-.5.31915 ELSE RC(II)=(DELTA(AP)/DELTA(II))^-3.92156864
1268 NEXT II
1270 REM CALCULO DE PTB
1275 PTB=0
1276 FOR II=1 TO NR
1277 PTB=PTB+RC(II)*(NP(II)/RP(II))
1278 NEXT II:ML=MG(AP):II=AP:Q=QR(AP):GOTO 1280
1279 II=AP:Q=QR(AP):IF NA=1 THEN GOSUB 5000: REM DURACAO DO TERCEIRO RECAPEAMENTO
1280 MS=ML:IT=0:E4=ML:GOSUB 4000
1281 RF=RH(3):GOSUB 4300
1285 AND(3)=RN/PTB
1290 IF AND(3)=VUM THEN 1330
1300 RH(3)=RH(3)+1!
1310 IF RH(3)=HX THEN 1251
1320 ST=ST+AND(2): RH(3)=0!:AND(3)=0!:A25(3)=0!:GOTO 1120
1330 CCNT=CCNT+RH(3)
1340 IF CCNT>H0 THEN 1410
1350 KY=1 :A25(1)=.65*AND(1)
1360 A25(2)=.65*AND(2)+AND(1)
1370 A25(3)=.65*AND(3)+AND(2)+AND(1)
1380 GOSUB 2500
1390 GOSUB 3000
1400 GOTO 1300
1410 CCNT=RH(1):ST=ST+AND(2)
1420 RH(3)=0!:AND(3)=0!:A25(3)=0!:GOTO 1120
1430 A25(1)=.65*AND(1):A25(2)=0!:A25(3)=0
1440 GOSUB 2500
1450 GOSUB 3000
1460 KY=1
1470 IF KY<>0 THEN 1530
1480 PRINT:PRINT
1490 PRINT
1500 PRINT "NAD HA SOLUCAO QUE SATISFACA AS CONDICAOES FORNECIDAS"
1510 PRINT
1520 END
1530 PRINT "ESTRATEGIAS DE RESTAURACAO E CONSERVACAO": PRINT "SERAO FORNECIDAS NO MAXIMO 5 ESTRATEGIAS"
1535 PRINT:PRINT:PRINT:PRINT:PRINT:PRINT
1540 FOR ID=1 TO IND
1550 IF ID=3 OR ID=5 THEN PRINT
1560 PRINT
1570 PRINT "ESTRATEGIA";ID
1580 IF ALT<>0 THEN PRINT "LAMA OU TSD NO AND";0
1590 YEAR=ALT
1600 FOR ID=1 TO 3

```

```
1610 IF ERF(ID,IC)=0 THEN 1660
1620 IF IC<>1 THEN YEAR=PERF(ID,IC-1)+YEAR
1625 E=YEAR+ASE: YZ=E: M=E-YZ: M=M*12: MSZ=M
1626 IF MSZ<0 THEN MSZ=12+MSZ: YZ=YZ-1
1630 PRINT ERF(ID,IC); "CM DE CBUQ EM"; MSZ; "/"; YZ
1640 IF CLPERF(ID,IC)>PA THEN 1660
1645 PD=CLPERF(ID,IC): YT=ASE+PD: TYZ=YT: X=YT-TYZ: X=X*12: MYZ=X
1650 PRINT "LAMA OU TSD EM"; MYZ; "/"; TYZ
1660 NEXT IC
1670 PRINT "CUSTO TOTAL EM CZ$/METRO QUADRADO"; PRECD(ID)
1680 PRINT "VALOR PRESENTE DA CONSTRUCAO FUTURA"
1690 PRINT:PRINT:PRINT:PRINT:PRINT:PRINT:NEXT ID
1700 YEAR=0!
1710 PRINT "ESTRATEGIAS DE RESTAURACAO E CONSERVACAO":PRINT "ANALISE DE CUSTO INICIAL"
1720 FOR ID=1 TO IND
1730 YEAR=0!
1740 IF ID=3 OR ID=5 THEN PRINT
1750 PRINT
1760 PRINT "ESTRATEGIA";ID
1770 FOR IC=1 TO 3
1780 IF RD(ID,IC)=0! THEN 1830
1790 IF IC<>1 THEN YEAR=CD(ID,IC-1)+YEAR
1795 YR=YEAR+ASE: YZ=YR: M=YR-YZ: M=M*12: MSZ=M
1796 IF MSZ<0 THEN MSZ=12+MSZ: YZ=YZ-1
1800 PRINT RD(ID,IC); "CM DE CBUQ EM"; MSZ; "/"; YZ
1810 IF ECO(ID,IC)>PA THEN 1830
1815 PD=ECO(ID,IC): YT=ASE+PD: TYZ=YT: X=YT-TYZ: X=X*12: MYZ=X
1820 PRINT "LAMA OU TSD EM"; MYZ; "/"; TYZ
1830 NEXT IC
1840 PRINT "CUSTO INICIAL EM CZ$/METRO QUADRADO"; GUARDA(ID)
1850 PRINT "CUSTO TOTAL EM CZ$/METRO QUADRADO"; TT(ID)
1860 PRINT "VALOR PRESENTE DA CONSTRUCAO FUTURA"
1870 PRINT:NEXT ID
1880 IF IND=2 OR IND=4 THEN PRINT
1890 PRINT
1910 PRINT
1920 END
2000 REM SUBROUTINE CALC(QM,HH,HR)
2010 QM=((((HH*(60000!^(1/3)))+HR*(QM^(1/3)))/(HR+HH))^(3
2020 MF=.379*QM
2030 RETURN
2500 REM SUBROUTINE ORCAMT
2510 GAS=0
2520 T=ALT
2530 JUMP=0
2540 IF ALT>0 THEN GAS=CLA
2550 FOR MIT=1 TO 3
2560 IF MIT=1 THEN GOTO 2590
2570 IF RH(MIT)=0! THEN GOTO 2610
2580 T=AND(MIT-1)+T
2590 CBIC=RH(MIT)/100
2600 GAS=GAS+CS*CBIC/((1+COC)^T)
2610 NEXT MIT
2620 FOR MIT=1 TO 3
2630 IF A25(MIT)<>0! AND A25(MIT)<=PA THEN GAS=GAS+CLA/((1+COC)^A25(MIT))
2640 NEXT MIT
2650 IF (IND-4)<=0 THEN 2680
2660 KODI6=1: IF PRECD(5)>GAS THEN 2760
```

```

2670 RETURN
2680 IND=IND+1
2690 IF IND<>1 THEN 2760
2700 PRECO(1)=GAS
2710 FOR MIT=1 TO 3
2720 PERF(1,MIT)=AND(MIT)
2730 ERF(1,MIT)=RH(MIT)
2740 CLPERF(1,MIT)=A25(MIT):NEXT MIT
2750 RETURN
2760 FOR MIT=1 TO IND-1
2770 IF JUMP<>0 THEN 2920
2780 IS=IND-MIT
2790 IF PRECO(IS)<GAS THEN 2810
2800 GOTO 2870
2810 PRECO(IS+1)=GAS
2820 FOR NMR=1 TO 3
2830 PERF(IS+1,NMR)=AND(NMR)
2840 CLPERF(IS+1,NMR)=A25(NMR)
2850 ERF(IS+1,NMR)=RH(NMR):NEXT NMR
2860 JUMP=1 : GOTO 2920
2870 PRECO(IS+1)=PRECO(IS)
2880 FOR NMR=1 TO 3
2890 PERF(IS+1,NMR)=PERF(IS,NMR)
2900 CLPERF(IS+1,NMR)=CLPERF(IS,NMR)
2910 ERF(IS+1,NMR)=ERF(IS,NMR):NEXT NMR
2920 NEXT MIT
2930 IF JUMP<>0 THEN 2990
2940 PRECO(1)=GAS
2950 FOR NMR=1 TO 3
2960 PERF(1,NMR)=AND(NMR)
2970 CLPERF(1,NMR)=A25(NMR)
2980 ERF(1,NMR)=RH(NMR):NEXT NMR
2990 RETURN
3000 REM SUBROUTINE ORCMT
3010 GAS=0!:T=ALT:JUMP=0
3020 IF KODIG=1 THEN I2=IND ELSE I2=IND-1
3030 IF ALT>0 THEN GAS=CLA
3040 FOR MIT=1 TO 3
3050 IF MIT=1 THEN 3080
3060 IF RH(MIT)=0! THEN 3120
3070 T=AND(MIT-1)+T
3080 CBIC=RH(MIT)/100
3090 GAS=GAS+CS+CBIC/((1+COC)^T)
3100 IF MIT<3 THEN 3120
3110 IF ALT>0 THEN PD=CLA ELSE PD=GAS
3120 NEXT MIT
3130 FOR MIT=1 TO 3
3140 IF A25(MIT)<>0! AND A25(MIT)<=PA THEN GAS=GAS+CLA/((1+COC)^A25(MIT))
3150 NEXT MIT
3160 IF I2<=4 THEN 3200
3170 IF GUARDA(5)>PD THEN 3300
3180 IF ((GUARDA(5)>PD) OR ((GUARDA(5)=PD)AND(TT(5)>GAS))) THEN 3290
3190 RETURN
3200 I2=I2+1
3210 IF I2<>1 THEN 3290
3220 TT(1)=GAS
3230 GUARDA(1)=PD
3240 FOR MIT=1 TO 3

```

```

3250 CO(1,MIT)=ANG(MIT)
3260 RO(1,MIT)=RH(MIT)
3270 ECO(1,MIT)=A25(MIT):NEXT MIT
3280 RETURN
3290 FOR MIT=1 TO I2-1
3300 IF JUMP<>0 THEN 3480
3310 IS=I2-MIT
3320 IF ((GUARDA(IS)<PD) OR ((GUARDA(IS)=PD)AND(TT(IS)<GAS))) THEN 3340
3330 GOTO 3420
3340 TT(IS+1)=GAS
3350 GUARDA(IS+1)=PD
3360 FOR NMR=1 TO 3
3370 CO(IS+1,NMR)=ANG(NMR)
3380 ECO(IS+1,NMR)=ECO(IS,NMR)
3390 RO(IS+1,NMR)=RO(IS,NMR):NEXT NMR
3400 JUMP=1
3410 GOTO 3480
3420 TT(IS+1)=TT(IS)
3430 GUARDA(IS+1)=GUARDA(IS)
3440 FOR NMR=1 TO 3
3450 CO(IS+1,NMR)=CO(IS,NMR)
3460 ECO(IS+1,NMR)=ECO(IS,NMR)
3470 RO(IS+1,NMR)=RO(IS,NMR):NEXT NMR
3480 NEXT MIT
3490 IF JUMP<>0 THEN 3560
3500 TT(1)=GAS
3510 GUARDA(1)=PD
3520 FOR NMR=1 TO 3
3530 CO(1,NMR)=ANG(NMR)
3540 ECO(1,NMR)=A25(NMR)
3550 RO(1,NMR)=RH(NMR):NEXT NMR
3560 RETURN
4000 REM SUBROUTINE DEFLEX(HR,M,MS,Q,II)
4001 IF IT=2 OR IT=3 OR IT=4 THEN 4144
4005 IF NC+1=N THEN 4110
4010 IF IC(NC+1)=1 THEN 4110
4020 QQ=Q:B=.018007*(HR^.663)*(H(NC+1)^-.7434)*(M^.6924)*(MS^-.4577)*(K1(NC+1)^.7814)*(K2(NC+1)^-2.293)
4030 D=4.8793*(HR^-.8058)*(M^-.3593)*(MS^.432)*(Q^.1716)
4040 ME=B*(QQ^.3063):ED=D*(ME^-.07506)
4050 QD=Q:FOR J=1 TO NB(II)-1
4060 QD=QD+Q*EXP(-(D(II,J)/R(II))*ED)
4070 NEXT J
4080 IF ABS(QD-QQ)>.05 THEN QD=QD:GOTO 4040
4083 IF ID=2 THEN E3=ME : GOSUB 4200
4084 IF ID=2 THEN 4100
4085 IF ID=1 THEN 4141
4090 D=814231.5*(HR^-.9672)*(H(NC+1)^.2124)*(M^-.4414)*(MS^-.3312)*(QD^.8779)*(K1(NC+1)^-.2243)*(K2(NC+1)^.6
4100 RETURN
4110 ED=4.8793*(HR^-.8058)*(M^-.3593)*(MS^.432)*(ME^-.07506)*(Q^.1716)
4120 QD=Q:FOR J=1 TO NB(II)-1
4130 QD=QD+(Q*EXP(-(D(II,J)/R(II))*ED)):NEXT J
4133 IF ID=2 THEN E3=ME : GOSUB 4200
4134 IF ID=2 THEN 4100
4135 IF ID=1 THEN 4141
4140 D=209787*(HR^-.7831)*(H(NC+1)^.06933)*(M^-.2852)*(ME^-.277)*(MS^-.4047)*(QD^.9224):RETURN
4141 E1=ME:E2=MS:RM=E1/E2:HM=H(NC+1):A=R/II+HR*TAN(PI/6):P=(QD*1000)/(F1*(R(II)^2)):IT=5:RE=HM/A:GOTO 4144
4142 EN=(1.68*P*A)/(D/1000):E1=M:E2=EN:A=R(II):RM=E1/E2:RE=HR/A:IT=1:GOTO 4144
4143 RETURN

```

```

4144 IF RM<2! THEN 4181
4145 REM SOLUCAO DE BURMISTER(1962)
4146 IF RM=2! AND RM<5! THEN I1=1: I2=2: N1=2!: N2=5!
4147 IF RM=5! AND RM<10! THEN I1=2: I2=3: N1=5!: N2=10!
4148 IF RM=10! AND RM<20! THEN I1=3: I2=4: N1=10!: N2=20!
4149 IF RM=20! AND RM<50! THEN I1=4: I2=5: N1=20!: N2=50!
4150 IF RM=50! AND RM<100! THEN I1=5: I2=6: N1=50!: N2=100!
4151 IF RM=100! AND RM<200! THEN I1=6: I2=7: N1=100!: N2=200!
4152 IF RM=200! AND RM<500! THEN I1=7: I2=8: N1=200!: N2=500!
4153 IF RM=500! AND RM<1000! THEN I1=8: I2=9: N1=500!: N2=1000!
4154 IF RM=1000! AND RM<2000! THEN I1=9: I2=10: N1=1000!: N2=2000!
4155 IF RM=2000! AND RM<5000! THEN I1=10: I2=11: N1=2000!: N2=5000!
4156 IF RM=5000! THEN I1=11: I2=12: N1=5000!: N2=10000!
4157 IF RE<.25 THEN J1=1: J2=2: T1=0!: T2=.25
4158 IF RE=.25 AND RE<.5 THEN J1=2: J2=3: T1=.25: T2=.5
4159 IF RE=.5 AND RE<.75 THEN J1=3: J2=4: T1=.5: T2=.75
4160 IF RE=.75 AND RE<1! THEN J1=4: J2=5: T1=.75: T2=1
4161 IF RE=1! AND RE<1.5 THEN J1=5: J2=6: T1=1!: T2=1.5
4162 IF RE=1.5 AND RE<2! THEN J1=6: J2=7: T1=1.5: T2=2!
4163 IF RE=2! AND RE<2.5 THEN J1=7: J2=8: T1=2!: T2=2.5
4164 IF RE=2.5 AND RE<3! THEN J1=8: J2=9: T1=2.5: T2=3!
4165 IF RE=3! AND RE<3.5 THEN J1=9: J2=10: T1=3!: T2=3.5
4166 IF RE=3.5 AND RE<4! THEN J1=10: J2=11: T1=3.5: T2=4!
4167 IF RE=4! THEN J1=11: J2=12: T1=4!: T2=4.5
4170 R1=IR(I1,J1): R2=IR(I2,J1): M1=N1: M2=N2: IO=(LOG(R1/R2))*(LOG(M1/RM)): IO=IO/(LOG(M1/M2)): IO=EXP(IC
4171 O1=IO
4172 R1=IR(I1,J2): R2=IR(I2,J2): IO=(LOG(R1/R2))*(LOG(M1/RM)): IO=IO/(LOG(M1/M2)): IO=EXP(IO): IO=R1/IO
4173 O2=IO
4174 RI=((RE-T1)/(T2-T1))*LOG(O1/O2): R1=EXP(RI): RI=O1/R1
4175 D=(2*P*A*RI)/E2:D=D*1000
4177 IF IT=5 THEN 4142
4178 RETURN
4180 REM SOLUCAO DE UESHITA E MEYERHOFF (1968)
4181 IF RE<.4 THEN I1=0!: I2=.4: N1=0!: N2=.205
4182 IF RE=.4 AND RE<1! THEN I1=.4: I2=1!: N1=.205: N2=.6475
4183 IF RE=1! AND RE<1.75 THEN I1=1!: I2=1.75: N1=.6475: N2=.895
4184 IF RE=1.75 AND RE<2! THEN I1=1.75: I2=2!: N1=.895: N2=1.075
4185 IF RE=2! AND RE<3! THEN I1=2!: I2=3!: N1=1.075: N2=1.2525
4186 IF RE=3! AND RE<4! THEN I1=3!: I2=4!: N1=1.2525: N2=1.3575
4187 IF RE=4! AND RE<5! THEN I1=4!: I2=5!: N1=1.3575: N2=1.425
4188 IF RE=5! AND RE<6! THEN I1=5!: I2=6!: N1=1.425 : N2=1.47
4189 IF RE=6! AND RE<7! THEN I1=6!: I2=7!: N1=1.47 : N2=1.5
4190 IF RE=7! AND RE<8! THEN I1=7!: I2=8!: N1=1.5 : N2=1.5225
4191 IF RE=8! AND RE<9! THEN I1=8!: I2=9!: N1=1.5225: N2=1.535
4192 IF RE=9! THEN I1=9!: I2=10!: N1=1.535: N2=1.5425
4193 IB=N2*(RE-I1)+N1*(I2-RE): IB=IB/(I2-I1)
4194 FR=IB/1.68
4195 FC=FR+RM*(1-FR)
4196 D=(1.68*P*A*FC)/E1
4197 D=1000*D
4198 IF IT=5 THEN 4142
4199 RETURN
4200 REM SOLUCAO DE UZAN E LYTON (TRF 888)
4210 A=R(I1): P=(1000*QD)/(P1*(R(I1)^2))
4220 GOSUB 7000
4230 RETURN
4300 REM SUBROUTINE REPTN (D,RF)
4310 IF RF>10! THEN RN=10!^( (3.438-(LOG(D)/LOG(10!)))/.255: ELSE RN=10!^( (3.148-(LOG(D)/LOG(10!)))/.188:

```



```

4320 RETURN
5000 REM SUBROUTINE TRESO (HR,M,CP,II,Q)
5005 IF CP=1 THEN Q=2.05: II=1: NB(II)=2: D(1,1)=30!: R(1)=10.8
5010 IF NC+1=N THEN 5300
5020 IF IC(NC+1)=1 THEN 5300
5025 REM CASO DE BASE GRANULAR
5030 HA=0!: HB=H(NC+1): YW=0
5032 F=28.1346*(HR^-.6789)*(M^-.2497)*(K1(NC+1)^-.209)*(K2(NC+1)^.4933)
5034 B=.094137*(HR^1.3)*(M^1.031)*(K1(NC+1)^-.3774)*(K2(NC+1)^1.018)
5036 T=121.2676*(HR^-1.158)*(M^-.5252)*(K1(NC+1)^.2011)*(K2(NC+1)^-.5415)
5040 FOR I=NC+2 TO N
5050 IF IC(I)=1 AND I<N THEN HA=HA+H(I): GOTO 5290
5060 IF IC(I)=1 AND I=N THEN 5290
5070 IF IC(I)=3 THEN 5190
5080 REM CAMADA I EH GRANULAR
5090 FA=F*((HA+HB)^-1.163)
5100 CH=.7935: ES=.4575
5110 SP=0!: FOR J=1 TO I-1: SP=SP+G(J)*H(J): NEXT J
5120 QQ=Q:GOSUB 5700
5125 IF CP=0 AND NB(II)=1 THEN 5280
5130 BM=B*((HA+HB)^-.7711)
5140 EW=Q: MU=MR(I): GOSUB 6020
5150 QQ=QB:GOSUB 5700
5160 EW=QB: MU=MR(I): GOSUB 6020
5170 QQ=QB: GOSUB 5700
5180 GOTO 5280
5190 REM CAMADA I TEM MODELO BI-LINEAR
5200 TA=T*((HA+HB)^-.99)
5210 HC=1.053:MM=.279: QQ=Q: GOSUB 5840
5220 IF CP=0 AND NB(II)=1 THEN 5280
5230 BM=B*((HA+HB)^-.7711)
5240 MU=MR(I): EW=Q: GOSUB 6020
5250 QQ=QB: GOSUB 5840
5260 EW=QB: MU=MR(I): GOSUB 6020
5270 QQ=QB: GOSUB 5840
5280 IF I<N THEN HA=HA+H(I)
5290 NEXT I
5295 GOTO 5540
5300 REM CASO DE BASE DE MODULO CONSTANTE
5305 IF NC+1=N THEN HB=H(NC): MB=MR(NC): YW=1: TL=N: GOTO 5320
5310 HB=H(NC+1): MB=MR(NC+1): YW=1: TL=NC+2
5320 FOR I=TL TO N
5330 IF IC(I)=1 AND I<N THEN 5520
5340 IF IC(I)=1 AND I=N THEN 5530
5350 IF IC(I)=3 THEN 5460
5360 REM CAMADA I EH GRANULAR
5370 FA=70.31*(HR^-1.309)*(HB^-.789)*(M^-.7494)*(MB^-.4846)
5380 SP=0!: FOR J=1 TO I-1: SP=SP+G(J)*H(J): NEXT J
5390 CH=.8927: ES=.249: QQ=Q: GOSUB 5700
5400 IF CP=0 AND NB(II)=1 THEN 5520
5410 EW=Q: MU=MR(I): HA=0!: GOSUB 6020
5420 QQ=QB:GOSUB 5700
5430 EW=QB: MU=MR(I): GOSUB 6020
5440 QQ=QB: GOSUB 5700
5450 GOTO 5520
5460 REM CAMADA I TEM MODELO BI-LINEAR
5470 TA=34.503*(HR^-1.4665)*(HB^-1.4)*(M^-.0233)*(MB^-.5319)
5480 HC=.9441: MM=.5079: QQ=Q: GOSUB 5840

```

```

5490 IF CP=0 AND NB(II)=1 THEN 5520
5500 MU=MR(I): HA=0!: GOSUB 6020
5510 QQ=QB: GOSUB 5840
5520 IF I<N THEN MB=(HB*(NB^(1/3))+H(I))*(MR(I)^(1/3))/(HB+H(I))^3:HB=HB+H(I)
5530 NEXT I
5540 REM TRANSFORMACAO EM TRES CANADAS
5550 ML=MR(N)
5555 IF N=NC+2 OR N=NC+1 THEN 5620
5557 Z=0!:FOR J=1 TO N-1:Z=Z+H(J):NEXT J
5560 FOR I=N TO NC+3 STEP-1
5565 Z=Z-H(I-1)
5570 E1=MR(I-1):E2=ML:HH=H(I-1):A=R(II)+Z*TAN(PI/6)
5580 RM=E1/E2:RE=HH/A:P=(1000*Q/(PI*(R(II)^2))):IT=2:GOSUB 4000
5590 ML=(1.68*P*A)/(D/1000)
5610 NEXT I
5620 RETURN
5700 REM SUBROUTINE SOLVE-GRANULAR(CH,ES,SP,QB)
5710 ALFA=FA*(QB^CH)
5715 IF CP=1 THEN SX=.1 ELSE SX=.5
5720 MS=K1(I)*(SX^K2(I))
5730 S3=SP+ALFA*(MS^ES)
5740 SM=K1(I)*(S3^K2(I))
5750 IF ABS(SM-MS)>50! THEN MS=SM:GOTO 5730
5760 MR(I)=SM
5770 RETURN
5840 REM SUBROUTINE SOLVE-BILINEAR(HC,MM,QB,I)
5841 BETA=TA*(QB^HC)
5842 M5=4*(C2(I)+C3(I)*C1(I)):M5=M5+((BETA*C3(I))^2):M5=.5*(-C3(I)*BETA+SQR(M5)):M5=M5^2
5843 IF MM=.5079 THEN MS=M5:GOTO 5850
5844 M0=C2(I)+C3(I)*(C1(I)-BETA)
5845 MS=(M0+M5)/2
5850 IF MS<C2(I) THEN 5930
5855 SD=BETA*(MS^MM)
5870 IF SD>C1(I) THEN 5930
5880 SM=C2(I)+C3(I)*(C1(I)-SD):DS=BETA*(SM^MM)
5890 IF DS>C1(I) THEN SD=DS:GOTO 5930
5900 MS=C2(I)+C3(I)*(C1(I)-DS)
5910 S=(MS-SM)/MS:IF ABS(S)<.05 THEN 6000
5920 GOTO 5855
5930 MS=-4*(C1(I)*C4(I)-C2(I)):M5=((C4(I)*BETA)^2)+M5:M5=(C4(I)*BETA)+SQR(M5):M5=M5/2:M5=M5^2
5931 IF MM=.5079 THEN MS=M5:GOTO 5934
5932 M0=C2(I)+C4(I)*(BETA-C1(I))
5933 MS=(M0+M5)/2
5934 SD=BETA*(MS^MM)
5935 SM=C2(I)+C4(I)*(SD-C1(I))
5936 IF SM<0! THEN SD=C1(I)-(C2(I)/(2*C4(I))):GOTO 5935
5940 DS=BETA*(SM^MM)
5950 IF DS<C1(I) THEN SD=DS:GOTO 5880
5960 MS=C2(I)+C4(I)*(DS-C1(I))
5970 IF MS<0! THEN DS=C1(I)-(C2(I)/(2*C4(I))):GOTO 5960
5980 S=(MS-SM)/MS:IF ABS(S)<.05 THEN 6000
5990 SD=BETA*(MS^MM):GOTO 5935
6000 MR(I)=MS:IF MS<100! THEN MR(I)=100!
6010 RETURN
6020 REM SUBROUTINE ESWL=VERTICAL SUBGRADE STRESS(MU,EW)
6030 IF YW=0 THEN MB=BM*(MU^.4303)*(EW^-.2047)
6040 EV=4.1787*(HR^-.4976)*((HA+HB)^.06373)*(M^-.2895)*(MU^.2281)*(MB^.06548)*(Q^.185)
6050 QB=Q:H7=HR+HA+HB

```

```

6060 FOR J=1 TO NB(I1)-1
6070 QB=QB+(Q*EXP((-D(I1,J)/HZ)*EV))
6080 NEXT J
6090 RETURN
7000 REM EQUACAO DE UZAN E LYTTON (TRR 888) PARA SISTEMA DE QUATRO CAMADAS (E1,E2,E3,E4,T1,T2,T3,A,P)
7010 R1=E1/E4 : R2=E2/E4 : R3=E3/E4 : R4=T2/A : R5=T3/A
7020 S=.03*(LOG(R3)/LOG(10!))^2
7030 S=S+(LOG(R2)/LOG(10!))*(-.0216*(LOG(R2)/LOG(10!))+.0074*(LOG(R3)/LOG(10!)))
7040 S=S+(LOG(R1)/LOG(10!))*(-.03315*(LOG(R1)/LOG(10!))+.0145*(LOG(R2)/LOG(10!))+.0095*(LOG(R3)/LOG(10!)))
7050 S=S+(LOG(1+R5)/LOG(10!))*(-.0474*(LOG(R1)/LOG(10!))+.022*(LOG(R2)/LOG(10!))+.022*(LOG(R3)/LOG(10!)))
7060 S=S+(LOG(R4)/LOG(10!))*(-.172*(LOG(R4)/LOG(10!))+.1143*(LOG(1+R5)/LOG(10!))+.0118*(LOG(R1)/LOG(10!))-
.0965*(LOG(R3)/LOG(10!)))
7070 S=S+.2847-.0898*(LOG(R4)/LOG(10!))- .2441*(LOG(R1)/LOG(10!))- .183*(LOG(R2)/LOG(10!))- .046*(LOG(R3)/LOG(
7080 R=.102*(LOG(R3)/LOG(10!))+.1246*(LOG(R2)/LOG(10!))- .2191*(LOG(R1)/LOG(10!))+.0986*(LOG(1+R5)/LOG(10!))
7100 REM CALCULO DA DEFLEXAO
7110 R0=T1/A
7120 S=-.2361*(LOG(R0)/LOG(10!))+S+(LOG(R0)/LOG(10!))*(-.2075*(LOG(R0)/LOG(10!))+R)
7130 W=10!^S : D=(W*P*A)/E4
7140 D=D*1000
7150 RETURN
7500 REM SUBROUTINE DEFLEX - NIVEL C (HF,RF)
7510 D=RF+19.015+1.357*HF-1.016*Y1-3.893*Y2-5.23*Y3
7520 D=(238.14/D)^2
7530 RETURN
8000 REM SOLUCAO DE BURMISTER(1962) PARA CALCULO DE DEFLEXAO EM SISTEMA DE DUAS CAMADAS
8010 DIM IR(12,12)
8020 FOR I=1 TO 12:IR(I,1)=.84:NEXT I
8030 IR(1,2)=.812:IR(2,2)=.776:IR(3,2)=.732:IR(4,2)=.685:IR(5,2)=.626:IR(6,2)=.549:IR(7,2)=.476:IR(8,2)=.37
.6:IR(11,2)=.201:IR(12,2)=.159
8040 IR(1,3)=.771:IR(2,3)=.672:IR(3,3)=.6:IR(4,3)=.5210001:IR(5,3)=.426:IR(6,3)=.357:IR(7,3)=.296:IR(8,3)=.
=.146:IR(11,3)=.108:IR(12,3)=.084
8050 IR(1,4)=.72:IR(2,4)=.575:IR(3,4)=.485:IR(4,4)=.402:IR(5,4)=.309:IR(6,4)=.253:IR(7,4)=.2025:IR(8,
IR(10,4)=.1:IR(11,4)=.0727:IR(12,4)=.0583
8060 IR(1,5)=.677:IR(2,5)=.51:IR(3,5)=.404:IR(4,5)=.332:IR(5,5)=.245:IR(6,5)=.196:IR(7,5)=.16:IR(8,5
=.02:IR(10,5)=.0747:IR(11,5)=.0539:IR(12,5)=.0429
8070 IR(1,6)=.6:IR(2,6)=.415:IR(3,6)=.309:IR(4,6)=.241:IR(5,6)=.173:IR(6,6)=.137:IR(7,6)=.11:IR(8,6)
10,6)=.05:IR(11,6)=.0361:IR(12,6)=.0294
8080 IR(1,7)=.558:IR(2,7)=.359:IR(3,7)=.258:IR(4,7)=.195:IR(5,7)=.136:IR(6,7)=.108:IR(7,7)=8.3400011
=.0473:IR(10,7)=.0376:IR(11,7)=.0275:IR(12,7)=.0219
8090 IR(1,8)=.537:IR(2,8)=.332:IR(3,8)=.228:IR(4,8)=.167:IR(5,8)=.144:IR(6,8)=.0882:IR(7,8)=.0673:IR
4:IR(10,8)=.0304:IR(11,8)=.0223:IR(12,8)=.0175
8100 IR(1,9)=.52:IR(2,9)=.309:IR(3,9)=.209:IR(4,9)=.149:IR(5,9)=.0992:IR(6,9)=.0744:IR(7,9)=.0571:IR
3:IR(10,9)=.0251:IR(11,9)=.0187:IR(12,9)=.0148
8110 IR(1,10)=.492:IR(2,10)=.293:IR(3,10)=.195:IR(4,10)=.133:IR(5,10)=.0867:IR(6,10)=6.490001E-02:
585:IR(9,10)=.028:IR(10,10)=.0216:IR(11,10)=.016:IR(12,10)=.0126
8120 IR(1,11)=.482:IR(2,11)=.281:IR(3,11)=.184:IR(4,11)=.124:IR(5,11)=.0787:IR(6,11)=.0581:IR(7,11)=
(9,11)=.0246:IR(10,11)=.019:IR(11,11)=.0142:IR(12,11)=.0112
8130 IR(1,12)=.462:IR(2,12)=.272:IR(3,12)=.172:IR(4,12)=.116:IR(5,12)=.0727:IR(6,12)=.0534:IR(7,12)=.
(9,12)=.0221:IR(10,12)=.0173:IR(11,12)=.0127:IR(12,12)=.0101
8140 RETURN
9000 REM SUBROUTINE MODEF (M0,TCT)
9010 BE=1.734*(LOG(1.7572*HE)/LOG(10!))
9020 BT=BE*(TC/100)
9030 MF=EXP(BT)-BT-(.5*(BT^2))
9040 MF=MF^2.2655
9050 MF=M0/MF
9060 RETURN

```

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) PREUSSLER, E.S., "Estudo da Deformação Resiliente de Pavimentos Flexíveis e Aplicação ao Projeto de Camadas de Reforço", Tese D.SC., COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro (1983).
- (2) PINTO, S. e PREUSSLER, E.S., "Proposição de Método para Projeto de Reforço de Pavimentos Flexíveis, considerando a Resiliência - Versão II", 10.^a Reunião Mundial da International Road Federation, Rio de Janeiro (1984).
- (3) BURMISTER, D.M., "Influence Diagrams for Stresses and Displacements in a two-layer Pavement System for Airfields", Contract NBY 13009, Dept. of the Navy, Washington, D.C. (1965).
- (4) UESHITA, K. e MEYERHOFF, G.G., "Surface Displacement of an Elastic Layer under Uniformly Distributed Loads", Highway Research Record, No. 228 (1968).
- (5) PREUSSLER, E.S., MEDINA, J. e PINTO, S., "Resiliência de Solos Tropicais e sua Aplicação à Mecânica dos Pavimentos", Anais do 1º Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais em Engenharia, Rio de Janeiro (1981).
- (6) POULOS, H.G., e DAVIS, E.H., Elastic Solutions for Soil and Rock Mechanics, John Wiley & Sons, Inc., New York, 441 pp, (1974).
- (7) YODER, E.J. e WITCZAK, M.W., Principles of Pavement Design, Second Edition, John Wiley & Sons, Inc., New York (1975).
- (8) UZAN, J. e LYTTON, R.L., "Structural Design of Flexible Pavements: A Simple Predictive System", Transporta-

tion Research Record, No.888 (1978).

- (9) DUNCAN, J.M., MONISMITH, C.L. e WILSON, E.L., "Finite Element Analysis of Pavements", Highway Research Record , No.228 (1968).
- (10) PINTO, S. e PREUSSLER, E.S., "Proposição de Método para Projeto de Reforço de Pavimentos Flexíveis, considerando a Resiliência", IPR/DNER, Rio de Janeiro (1982).
- (11) HAAS, R. e HUDSON, W.R., Pavement Management Systems, McGraw-Hill, New York, 1st Ed. (1978).
- (12) QUEIROZ, C.A.V., "Performance Prediction Models for Pavement Management in Brazil", Ph.D. thesis, the University of Texas at Austin (1981).
- (13) PELL, P.S., "Characterization of Fatigue Behavior", Highway Research Board, Special Report 140, Washington , D.C. (1973).
- (14) MONISMITH, C.L., SECOR, K.E. e BLACKMER, E.W., "Asphalt Mixture Behavior in Repeated Flexure", Proc., Association of Asphalt Paving Technology, vol.30, pp 188-222 (1961).
- (15) PREUSSLER, E.S. e PINTO, S., "Fatores de Equivalência de Cargas", 19^a RAPV da Associação Brasileira de Pavimentação, Rio de Janeiro (1984).
- (16) MONISMITH, C.L. e DEACON, J.A., "Fatigue of Asphalt Paving Mixtures", Transportation Engineering Journal of ASCE, No. TE2 (1969).
- (17) RODRIGUES, R.M. e KOTSUBO, A.K., "Procedimento Analítico para Determinação da Carga de Roda Simples Equivalente em Estruturas de Pavimento Não-lineares e Aplicação no Cálculo de Tensões e Deformações", Trabalho

de Graduação, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, ITA, São José dos Campos (1985).

- (18) MOTTA, L.M.G. e CERATTI, J.A.P., "Comportamento Resiliente de Solos Arenosos Finos", 21.^a RAPv da Associação Brasileira de Pavimentação, Salvador (1986).
- (19) WITCZAK, M.W., "Design of Full-Depth Asphalt Airfield Pavements", Proceedings, Third International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, London, England (1972).
- (20) VARGAS, M., Introdução à Mecânica dos Solos, McGraw-Hill, São Paulo (1981).
- (21) SMITH, B.E. e WITCZAK, M.W., "Equivalent Granular Base Moduli: Prediction", Transportation Engineering Journal of ASCE, No. TE6, November (1981).
- (22) MAJIDZADEH, K., RAMSAMOOJ, D.V. e KAUFFMANN, E.M., "Application of Fracture Mechanics in the Analysis of Pavement Fatigue", Annual Meeting of the Assoc. of Asphalt Paving Technologists, Proc. AAPT, V.40 (1971).
- (23) PINTO, S. e PREUSSLER, E.S., "Módulos Resilientes de Concretos Asfálticos", IPR/DNER, Rio de Janeiro (1980).
- (24) GEIPOT/DNER, "Pesquisa para Desenvolvimento de Metodologia e Processamento de Dados do Sistema Gerencial de Pavimentos", Relatório Final, IPR/DNER, Março (1987).
- (25) VIOLA, E. e PASCALE, G., "Static Analysis Fatigue and Fracture of Cracked Beams on Elastic Foundation", Engineering Fracture Mechanics, Vol.21, No.2 (1985).
- (26) MAJIDZADEH, K. e ILVES, G., "Flexible Pavement Overlay

Design Procedures", Vol.I e II, Report FHWA-RD-79-99, Federal Highway Administration, Washington, D.C. (1980).

- (27) PREUSSLER, E.S. e PINTO, S., "Tecnologia Nacional para Restauração de Pavimentos Rodoviários e Aeroportuários - Programa Tecnapav", 19.^a RAPv da ABPv, Rio de Janeiro (1984).
- (28) PREUSSLER, E.S. e PINTO, S., "Contribuição do Trecho Experimental da BR-101/RJ Niterói - Manilha, em Programa de Pavimentação", 21.^a RAPv da ABPv, Salvador (1986).
- (29) PREVITERA, J.F., "Uma Reflexão sobre Coeficientes de Equivalência Estrutural", 15.^a RAPv da ABPv, Belo Horizonte (1980).
- (30) BOOKER, J.R. e SMALL, J.C., "The use of Micro-Computers to solve problems in geomechanics using finite layer methods", Fifth Int. Conf. on Numerical Methods in Geomechanics, Vol.3, Nagoya (1985).
- (31) FINN, F.N. e MONISMITH, C.L., "Asphalt Overlay Design Procedures", Transportation Research Board, NCHRP Synthesis 116 (1984).
- (32) PINTO, S. et alii, "Observações sobre a Pista Experimental de Santa Catarina (areia-cal-cinza volante)", 16.^a RAPv da ABPv, Recife (1981).
- (33) BOWLES, J.E., Foundation Analysis and Design, McGraw-Hill, Third Edition (1982).
- (34) PREUSSLER, E.S. e PINTO, S., "Aplicação do Método para Projeto de Reforço de Pavimentos Flexíveis considerando a Resiliência", 18.^a RAPv da ABPv, Porto Alegre (1983).